

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



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

**STUDIE MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ TESLOVY TURBÍNY JAKO
ZDROJ ENERGIE**

STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING TESLA'S TURBINE AS A SOURCE OF ENERGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Šedina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Kazda, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Martin Šedina

ID: 186458

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Studie možností využití Teslovy turbíny jako zdroj energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s různými typy turbín a jejich možnostmi využití v praxi. Podrobně prostudujte princip fungování a konstrukci Teslovy turbíny a navrhnete možnosti jejího využití. Dle vlastního návrhu zkonstruuje Teslovu turbínu a její výkonnostní parametry ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 3.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kazda, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

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 rozdělením a popisem dnes využívaných typů turbín, dále se práce zabývá teorií o bezlopatkové Teslově turbíně. V teoretické části se v práci probírají vodní kola, vodní turbíny s jejich rozdělením a zástupci, kteří jsou v práci popsány. Dále se v práci probírá konstrukce Teslovy turbíny, její možnosti využití, vnitřní principy a informace o jeho patentu. Praktická část obsahuje návrh Teslovy turbíny s modifikacemi pro zvýšení účinnosti. V práci je rozebrána výroba a sestavení turbíny a technologie využití k její výrobě. Je zde také popsán způsob, jakým se turbína měří a také k jakým jsme dospěli výsledkům.

KLÍČOVÁ SLOVA

Teslova turbína, bezlopatková turbína, vodní kola, rovnotlaké turbíny, přetlakové turbíny, 3D tisk, SolidWorks, 3D CAD, Arduino

ABSTRACT

The master thesis deals with the currently used types of water turbines and next part of the thesis deals with the theory of Tesla turbine. The theoretical part discusses water wheels, water turbines with their types and models which are described in the work. The thesis also discusses the construction of the Tesla turbine, its possibilities of using, inside principles and information about Tesla's patent. The practical part contains the design of the Tesla turbine with modifications for increasing efficiency. The thesis describes production and assembly of turbine and the technology used for production of the turbine. There is also described how the turbine was measured and there are results of measurements of the turbine.

KEYWORDS

Tesla turbine, bladeless turbine, equipotential turbines, overpressure turbines, 3D printing, SolidWorks, 3D CAD, Arduino

ŠEDINA, Martin. *Studie možností využití Teslovy turbíny jako zdroj energie*. Brno, 2020, 72 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kazda, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Studie možností využití Teslovy turbíny jako zdroj energie“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Kazdovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat svému dědovi Ing. Miloslavu Šedinovi, CSc. za rady ohledně funkce plyných turbín a doc. Ing., Jiřímu Maxovi, Ph.D. za pomoc při úpravě turbíny k výrobě a také Ing., Petru Vyroubalovi, Ph.D. a Ing., Kamilu Jašovi za 3D tisk.

Obsah

Úvod	10
1 Vodní kola	11
2 Turbína	15
2.1 Rozdělení vodních turbín	15
2.1.1 Rovnotlaké turbíny	15
2.1.2 Přetlakové turbíny	17
2.2 Parní turbíny	21
2.2.1 Rozdělení parních turbín	21
3 Teslova turbína	23
3.1 Teslův model	23
3.2 Nikola Tesla	24
3.3 Patent	26
3.4 Konstrukce turbíny	27
3.5 Fyzikální jevy	28
3.5.1 Mezní vrstva	28
3.5.2 Laminární proudění	29
3.5.3 Turbulentní proudění	29
3.5.4 Třecí ztráty	30
3.6 Využití	30
4 Porovnání turbín	31
5 Aditivní technologie	32
5.1 FDM	32
5.2 SLA	33
5.3 SLS	34
6 Návrh turbíny	35
6.1 Konstrukce	35
6.1.1 Návrhový program	35
6.1.2 Tělo	36
6.1.3 Disky	37
6.1.4 Uložení	39
6.1.5 Model	40
6.2 Simulace proudění	41

6.3	Výroba modelu	43
7	Výroba zařízení	44
7.1	Úprava konstrukce	44
7.1.1	Hřídel	45
7.1.2	Disky	45
7.1.3	Uložení hřídele a tělo	46
7.1.4	Ložiska	47
8	Měření turbíny	48
9	Sestavení turbíny	52
10	Naměřené parametry	56
10.1	Entalpie H [J]	56
10.2	První test turbíny	57
10.3	Naměření parametrů	57
11	Závěr	59
	Literatura	60
	Seznam příloh	66
A	Výrobní soubory	67
B	3D model	68
C	Video turbíny z bakalářské práce	69
D	Video a fotky turbíny z diplomové práce	70
E	Software	71
F	Obsah přiloženého CD	72

Seznam obrázků

1.1	Druhy kol	12
1.2	Dolní tok	13
1.3	Zuppingerovo kolo	13
1.4	Kolo s horním tokem a dopředným chodem	14
2.1	Pohled do Peltonovy turbíny	16
2.2	Turgo turbína	17
2.3	Bankiho turbína v provozu	18
2.4	Francisova turbína	19
2.5	Kaplanova turbína	20
2.6	Deriazova turbína	20
2.7	Jednostupňová turbína	22
3.1	Princip pohybu částic v Teslově turbíně	23
3.2	Hotový model Teslovy turbíny	24
3.3	Nikola Tesla	24
3.4	(A) Teslova Turbína, (B) Teslovo čerpadlo	27
3.5	Rozložená Teslova turbína	27
3.6	Mezní vrstva	28
3.7	Laminární proudění	29
3.8	Turbulentní proudění	29
5.1	3D tiskárna Prusa i3 MK3	33
5.2	Výtisk vytištěný pomocí SLA tiskárny	34
5.3	Výrobky vytištěné pomocí SLS technologie	34
6.1	Model těla turbíny	36
6.2	(A)Krajní disk (B) Vnitřní disk s distančním výstupkem	37
6.3	Plná část hřídele	38
6.4	Dutá část hřídele	39
6.5	Uložení hřídele	39
6.6	SolidWorks model	40
6.7	Řez modelem turbíny	40
6.8	Simulace rychlosti a pohybu média vstupu	41
6.9	Simulace pohybu média výstupu	41
6.10	Pohled na rychlost proudění výstupu	42
6.11	Pohled na tlak média ve výstupní části	42
7.1	Slepený model hřídele	44
7.2	Vnitřní pohled do hřídele	45
7.3	Disk s přiloženým vymežovacím kroužkem	46
7.4	Vnější konstrukce těla	47

8.1	Arduino UNO	49
8.2	LCD Shield	49
8.3	Čidlo BMP 280	50
8.4	Čidlo FS1012	51
9.1	Pohled do vnitřku sestavené turbíny	53
9.2	Kompletně složená turbína	54
9.3	Držák čidla na výstupu	55

Úvod

21. století se vyznačuje rostoucím tlakem na ekologii, což způsobuje rozmach využívání zdrojů obnovitelné energie. Mezi tyto zdroje ve velkém patří voda a také biomasa. Voda se využívala již od nepaměti, kdy v dobách Egyptské říše řeka Nil přinášela hojnost. Později, když se člověk naučil energii vody zkrotit, mu zjednodušovala práci a dnes nám slouží k výrobě bezemisní elektrické energie. Biomasa se sice není bezemisní, ale její princip tkví v tom, že rostlina během svého života oxid uhličitý spotřebovává a tak při jejím hoření dojde pouze k zpětnému vyrovnání této hladiny oxidu uhličitého.

K tomu aby jsme obě tyto energie mohli využít nám slouží turbíny. U vodních elektráren je voda přímo v kontaktu s tělem turbíny. Při využití energie ze spalování biomasy se využívá tepla k výrobě vodní páry, tato pára se poté využívá k roztáčení turbíny.

Tak jak se rozmáhá využívání obnovitelných zdrojů, tak se začínají rozmáhat i například elektromobily, což opět klade nároky na co nejnižší emisivitu při výrobě elektrické energie, protože elektromobil je jen tak nízkoemisní, jako je výroba energie v daném regionu. Proto se lidstvo snaží všechny tyto technologie na získání elektrické energie vylepšit a co možná nejvíce zefektivnit.

V práci bude probrána historie využití vodní energie. Dále také vodní turbíny, jejich rozdělení a představitelé. Budou zde zmíněny i parní turbíny. Hlavní část práce bude věnována Teslově turbíně. Práce bude zaměřena na její historii, konstrukci, princip fungování a fyzikální jevy které se v ní uplatňují. Je zde také popsán způsob úpravy turbíny a tvorba návrhu, ze kterého je sestavený zmenšený model původního návrhu. V práci budou popsány aditivní technologie, které je možné uplatnit při výrobě takového modelu. Poslední část práce se bude zabírat úpravou návrhu tak, aby mohl vzniknout prototyp Teslovi turbíny.

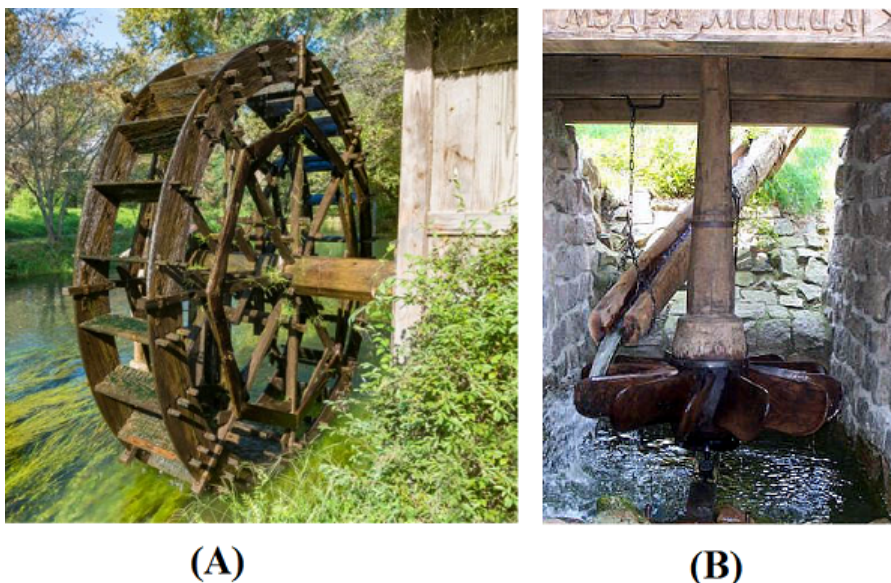
1 Vodní kola

Vodní kola jsou jedna z nejstarších zařízení, která člověk užíval pro pohon svých strojů a tím si ulehčoval svoji práci. Vodní kola ve většině případů, v závislosti na koncepci, využívají polohovou energii vody. Historicky byla vodní kola stavěna řemeslníky a nebralo se na zřetel fyzikální zákonitosti. To se ovšem změnilo s rozvojem lidského vědění, kdy se o tyto stroje začali zajímat myslitelé a začali uvažovat o uplatnění zákonů hydrodynamiky. Díky tomu vznikaly nové koncepce a zvyšování účinnosti. S příchodem vodních turbín začala být vodní kola vytlačována, avšak v některých případech se nejednalo o vhodnou náhradu.

Vodní kola lze rozdělit podle několika kritérií. Základní rozdělení je podle toho, jak jsou kola uchycena. A to na horizontální a vertikální. Dále lze vodní kola dělit podle toho, jak na ně natéká voda, a to na kola s dolním nátokem, se středním nátokem a s horním nátokem. Na obrázku 1.1 jsou vidět hlavní konstrukční rozdíly mezi vertikálním a horizontálním vodním kolem.

Zprvu se využívala kola horizontální, protože umožňovala přímé ukotvení na mlýnský kámen bez nutnosti dalších převodů energie, avšak neměla takovou účinnost jako kola vertikální.

Hlavní výhodou vodních kol oproti turbínám je jejich jednoduchá a robustní konstrukce, díky tomu nemají problém s nečistotami a předměty ve vodě. Další jejich výhodou je, že při povodních, kdy dochází k zvednutí hladiny a zvýšení průtoku, dochází u turbín ke ztrátě spádu a tím rapidnímu snížení účinnosti, zatímco vodní kola dokáží udržet pořád stejnou účinnost. A naopak v období nedostatku vody většinou turbíny nefungují, protože se zavzdušní, vodní kola dokáží pracovat i když velice pomalu a s minimální účinností, ale nezastaví se[1].



Obr. 1.1: (A) Vertikální kolo, (B) Horizontální kolo ((A) převzato z [2], (B) převzato z [3])

Vodní kolo na spodní vodu

Jedná se o konstrukčně nejjednodušší vodní kolo, další výhodou těchto kol je, že nepotřebují žádné jezy pro zadržení vody. Využívají pouze kinetickou energii vody, což snižuje jejich účinnost. Tato vodní kola nepotřebují velký spád, ale je nutné, aby měla velký průtok, proto byla umísťována na mělké a široké řeky.

Princip funkce je jednoduchý. Pod kolem protéká voda a opírá se do jeho lopatek a tím předává kinetickou energii. V celé soustavě však dochází k mnoha ztrátám, a tak se účinnost pohybuje okolo 30 %.

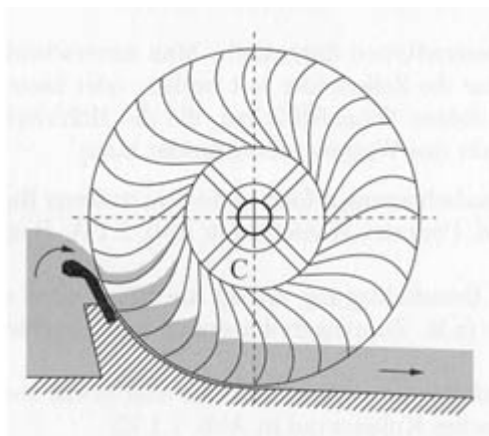
Tento typ kola nalezneme na lodních mlýnech. Jedná se o stavby stavěné na hladině vody, pokud poklesla hladina vody, poklesl i mlýn a tím se udržovalo i konstantní ponoření vodního kola [1]. Na obrázku 1.2 je mlýn Kolarovo, ve kterém se využívá vodní kolo na spodní vodu.



Obr. 1.2: Lodní mlýn Kolarovo, Slovensko (převzato z [4])

Vodní kolo se středním nátokem

Tyto kola pracují se spády od 1-3 m. Voda je na kolo přiváděna přes přívodní stavidlo, potřeba tohoto spádu již zapřičiňuje nutnost vyšší hladiny vody, a tedy tvorbu jezu. Voda při dopadu předá svoji kinetickou energii a při následném průtoku předává část své potenciální energie. Účinnost se pohybuje v rozmezí 70-75 % [1]. Princip fungování tohoto kola je vyobrazen na obrázku 1.3.

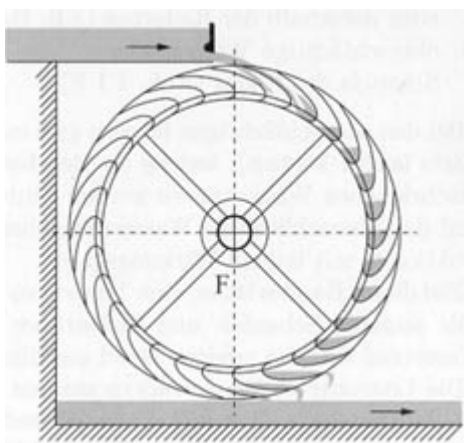


Obr. 1.3: Zuppingerovo kolo (převzato z [5])

Vodní kolo s horním nátokem

Jedná se o vodní kolo, které se svojí účinností (65-80 %) a principem funkce podobá některým turbínám. Tato vodní kola umí pracovat s chodem ve směru toku vody

nebo také proti směru toku vody, tento faktor se nastavuje pomocí směru lopatek na kole. Kolo je určeno na malé průtoky s velkými spády, proto je spíše vhodné ho využívat na malých vodních tocích jako jsou potoky. Voda je na kolo přivedena pomocí žlabu. Voda naplňuje nádobky na vodním kole a tím předá potenciální energii a kolo je dále rozpořhobováno pomocí gravitace. U tohoto kola je třeba počítat s tím, že pokud se dotýká dolní vody, snižuje se mu účinnost, proto se umísřuje několik centimetrů do vzduchu. Tento typ byl nejpoužívanějším typem vodních kol v Čechách [1]. Princip fungování tohoto kola je vyobrazen na obrázku 1.4.



Obr. 1.4: Kolo s horním tokem a dopředným chodem(převzato z [6])

2 Turbína

Turbína je mechanické rotační zařízení, které je tvořeno jedním nebo více oběžnými koly, kterými je poháněna hřídel. Tato zařízení jsou poháněna kinetickou a potenciální energií média sloužícího pro pohon, což může být jak plyn, tak kapalina.

Turbíny dnes nalezneme ve všech odvětvích průmyslu. Můžeme je nalézt například v dopravě jako proudové motory v letadlech nebo jako pohony velkých lodí. Jeden z nejznámějších pozemních strojů poháněných turbínou je americký tank M1 Abraham. Velké uplatnění mají turbíny při výrobě elektrické energie, a to jak ve vodních elektrárnách, tak v elektrárnách spalovacích.

Vodní turbíny jsou všechna zařízení, která využívají kinetickou a potenciální energii a přeměňují tuto energii na energii mechanickou. Přes hnanou hřídel a spojku je turbína připojena k poháněnému zařízení. Tato energie se dnes nejčastěji využívá pro výrobu elektrické energie, ale lze ji také využívat k pohybu různých strojů. Existují také turbíny reversní, které umí nejen získávat energii, ale při změně směru rotace mohou vodu zpětně čerpat, toho se hojně využívá v přečerpávacích elektrárnách [7].

2.1 Rozdělení vodních turbín

Turbíny lze dělit hned několika způsoby, ale nejběžnější dělení je na rovnotlaké a přetlakové turbíny. Dále je pak lze dělit podle ostříku oběžného kola na axiální a radiální [8].

2.1.1 Rovnotlaké turbíny

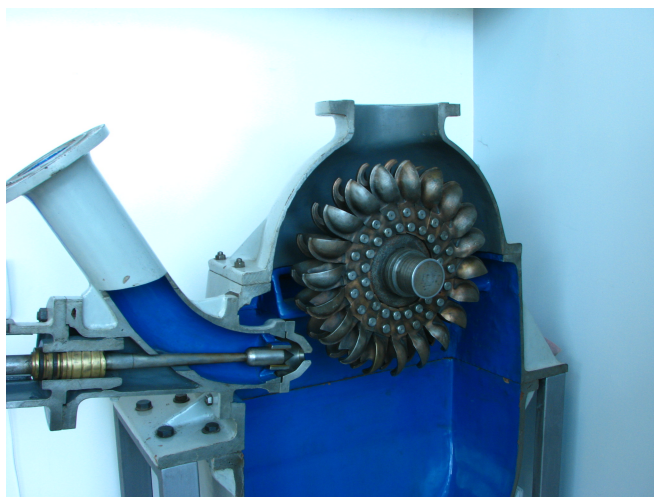
Do této skupiny turbín patří zařízení, která mají na vstupu stejný tlak média jako na výstupu. Turbíny tohoto typu lze využívat u obrovských spádů. Mezi tyto turbíny se řadí Peltonova turbína, Turgo a Bánkiho turbína [9].

Peltonova turbína

Tato turbína byla vynalezena L. A. Peltonem v 70. letech 19. století a má teoretickou účinnost až 95 %. Voda je do této turbíny vedena potrubím, které ústí v jednu nebo více dýz, odkud voda vychází pod tangenciálním úhlem a dopadá na oběžné kolo této turbíny. Oběžné kolo je tvořeno lopatkami ve tvaru lžičky, která má na kraji vykrojení pro odtok vody. Turbína díky tvaru svých lopatek dokáže využít téměř veškerou energii vody, která na ní dopadá. Poté co voda předá svou energii a vyteče

z lopatek, padá pod turbínu a je odváděna ven ze zařízení.

Tato turbína se využívá na vysokých spádech s malým průtokem a těží především ze své odolné konstrukce. Hojně se využívá v přečerpávacích elektrárnách. U nás ji najdete například v přečerpávací elektrárně Černé jezero [10]. Na obrázku 2.1 je vyobrazen ukázkový model Peltonovy turbíny.



Obr. 2.1: Pohled do Peltonovy turbíny(převzato z [11]).

Turgo turbína

Tato turbína byla vynalezena E. Crewdsonem na konci 20. let 20. století a lze s ní dosáhnout účinnosti až 90 %. Je to turbína s parciálním ostřikem lopatky a konstrukčně vychází z Peltonovy turbíny. Vezmeme-li konstrukci zjednodušeně, je oběžné kolo Turgo turbíny vlastně polovina kola z Peltonovy turbíny. To sebou nese jisté výhody jako je zjednodušení konstrukce, snížení nákladů na výrobu a převzetí některých vlastností. Její hlavní výhodou je, že při stejném průměru zvládne pracovat s větším průtokem než Peltonova turbína.

Tuto turbínu lze použít na větších spádech s poměrně malým průtokem. Ve velkých aplikacích se příliš nepoužívá, ale díky své jednoduché konstrukci a nízké ceně se hodí pro malé vodní elektrárny. Nalezneme ji například v Milford Sound na Novém Zélandu [12]. Na obrázku 2.2 je vidět instalace malé domácí elektrárny za použití Turgo turbíny.



Obr. 2.2: Turgo turbína(převzato z [13]).

Bankiho turbína

Turbínu vynalezl D. Banki v roce 1918 a její účinnost je okolo 78-84 %. Turbína využívá parciálního ostříku a je dvojně protékaná. Na prvním průtoku se chová jako přetlaková a na druhém jako rovnotlaká. Přísun vody je zde řízen pomocí klapky a voda dopadá na oběžné kolo, které je hustě oseté lopatkami směřujícími vodu ke středu kola. Největší část energie vody je předána při prvním průtoku a při druhém průtoku voda odevzdá zbytek své energie.

Tato turbína se používá na tocích s malým průtokem a pro výrobu malých výkonů. Její výhodou je, že má velmi plochou křivku maximálního výkonu. Tuto turbínu najdete především v malých domácích vodních elektrárnách [14]. Na obrázku 2.3 je vidět Bankiho turbína v provozu.

2.1.2 Přetlakové turbíny

Do této skupiny turbín patří zařízení, která mají na vstupu vyšší tlak média než na výstupu. Obecně jsou vhodnější pro menší spády než rovnotlaké turbíny. U těchto turbín nedochází ke ztrátě spádu. Mezi tyto turbíny se řadí Francisova turbína, Kaplanova turbína a Dériazova turbína [16].



Obr. 2.3: Bankiho turbína v provozu(převzato z [15]).

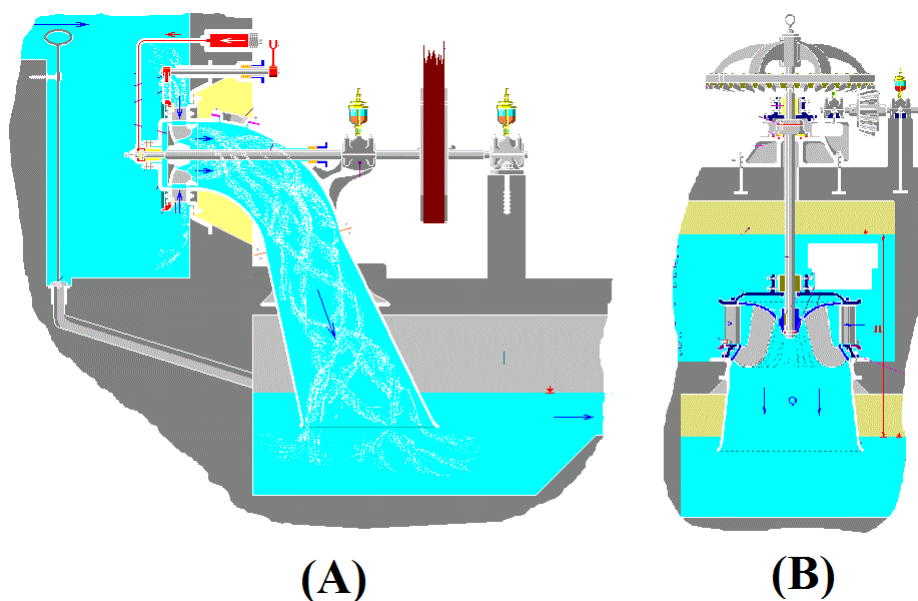
Francisova turbína

Turbínu vynalezl J. B. Francis v roce 1849. Turbínu lze využít jak vertikálně, tak horizontálně. V dnešní době se využívá především v horizontální poloze. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších turbín na světě. Na rozváděcím kole se nachází naklápěcí lopatky, to umožňuje udržování účinnosti při změnách průtoku. Jednou z výhod této turbíny je, že ji lze použít i jako čerpadlo, proto se hojně používá v přečerpávacích elektrárnách. U nás ji najdeme například v přečerpávací elektrárně Dlouhé Stráně.

Horizontální turbína s mokrou savkou je taková, která má vývěru pod vlastní kašnou a koleno je umístěno v kašně. Což nelze realizovat vždy. Turbína je uložena na hřídeli ve dvou ložiscích, jedno z ložisek je uloženo ve vodě a vede k němu speciální potrubí z vlastní maznice. Druhé se nachází ve štítu. Štít slouží jako zadní část turbíny.

Horizontální turbína se suchou savkou se využívá tam, kde koleno nemůže být uvnitř kašny. Díky tomu může být kašna hlubší a užší. Stejně jako u verze s mokrou savkou se nachází jedno ložisko ve vodě a potřebuje vlastní mazání. Za nevýhodu lze považovat hřídel, která prochází savkou, a proto se snižuje účinnost celého ústrojí [17]. Na obrázku 2.4 (B) je vyobrazen princip konstrukce konstrukce tohoto typu turbíny.

Vertikální provedení se využívá hlavně u menších vodních toků, jelikož je vhodné pro spády do 4 m. Turbína se nachází u dna kašny a je svisle spojena hřídelí až do strojovny. Řídicí lopatky řídí, pod jakým úhlem bude voda vstupovat do oběžného kola. Při vertikálním použití má savka tvar kužele, aby nedocházelo k rotacím vody ve sloupci při nižším vodním průtoku [18]. Na obrázku 2.4 (A) je vyobrazen princip konstrukce tohoto typu turbíny.



Obr. 2.4: (A) Vertikální Francisova turbína, (B) Horizontální Francisova turbína((A) převzato z [19], (B)převzato z [20]).

Kaplanova turbína

Tato turbína byla vynalezena českým profesorem V. Kaplanem na začátku 20. let 20. století. Tvarem by se tato turbína dala přirovnat k lodnímu šroubu. Tato turbína je nejrozšířenějším typem turbín užívaných na malých spádech a velkých průtocích. Kaplanova turbína má několik variant. Nejrozšířenější je S-Kaplan. Tato turbína má naklápěcí lopatky jak na regulačním kole, tak na kole oběžném, což má za následek zvýšení účinnosti za velmi proměnného průtoku vody. Díky těmto vylepšením se ovšem jedná o velmi složité mechanické zařízení. U tohoto provedení se musí využít savka ve tvaru S, aby z ní mohla vycházet hřídel. Největší Kaplanovy turbíny se nacházejí na vodní nádrži Gabčíkovo na Slovensku [21]. Kaplanova turbína je vyobrazena na obrázku 2.5.

2.2 Parní turbíny

Parní turbíny jsou zařízení, která využívají tepelnou energii uloženou v páře a přeměňují tuto energii na energii mechanickou za pomoci rotoru. Využívá se zde expanze vodní páry, která se provádí v jednom nebo více stupních. Samotná turbína je poté tvořena rozvodným a oběžným kolem, na kterém jsou lopatky. Dále je turbína hřídelí spojena s generátorem[41].

Velké množství dnes tvořené elektrické energie je vyráběno právě za pomoci parních turbín. Parní turbíny se využívají u všech tepelných elektráren, dále pak u jaderných elektráren a také u elektráren geotermálních a solárních.

Stejně jako vodní turbíny se dají rozdělit několika způsoby i turbíny parní. U parních turbín je ovšem mnohem víc parametrů, podle kterých se dělí.

2.2.1 Rozdělení parních turbín

Podle přeměny energie

- Akční turbína - pára expanduje pouze na rozvodných lopatkách
- Reakční turbína - pára expanduje na rozvodných i oběžných lopatkách

Podle počtu stupňů

- Jednostupňová
- Vícestupňová

Podle smyslu vstupu páry

- Axiální turbína - pára prochází zařízením ve směru osy rotoru turbíny
- Radiální turbína - pára vstupuje kolmo na osu rotoru turbíny
- Radiálně-axiální turbína - pára vstupuje do turbíny kolo na otáčení oběžných lopatek a vystupuje směru otáčení oběžných lopatek

Podle parametrů vstupní páry

- Přehřátá pára - běžný typ turbíny s jejím předehříváním
- Sytá pára - využívá se u jaderných elektráren s tlakovodním reaktorem

Podle využití výstupní páry

- Kondenzační turbína - ke kondenzaci procházející páry dochází v kondenzační části turbíny
- Protitlaková turbína - pára je po průchodu turbínou dále využívána
- Odběrová turbína - využitá část páry je odebírána mezi jednotlivými stupni

Podle odběru páry z turbíny

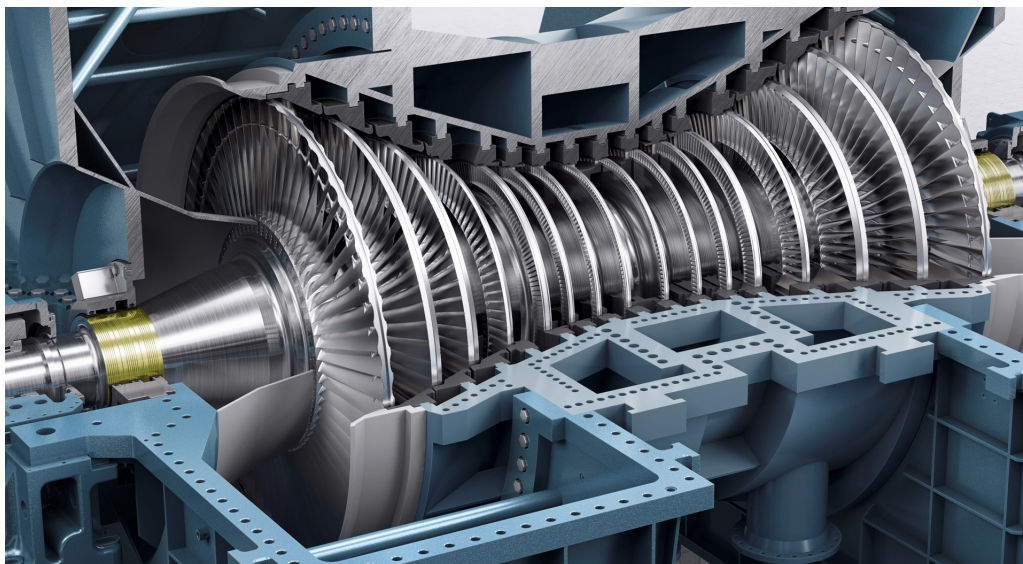
- Turbína s neregulovaným odběrem - pára je odebírána na jednom či více místech turbíny, u turbíny nedochází k regulaci tlaku odebírané páry
- Turbína s regulovaným odběrem - využívá se jednoho až tří odběrů, které slouží pro přenos tepla koncovým uživatelům, odběr páry se reguluje podle velikosti spotřeby páry

Podle uložení turbíny

- Turbína pevná
- Turbína lodní

Podle počtu těles

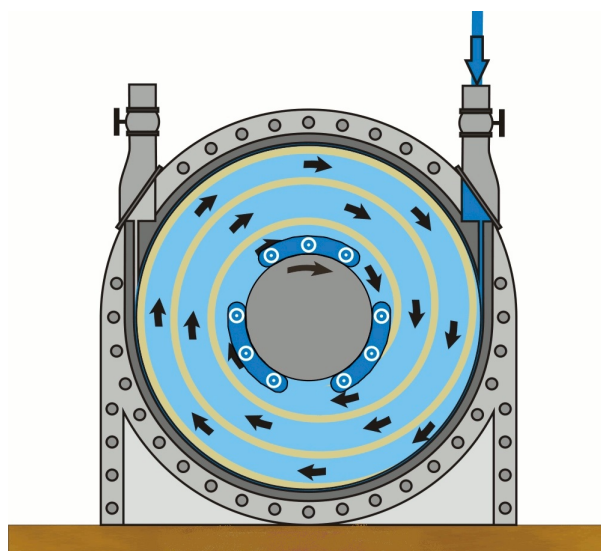
- Jednotělesová turbína
- Vícetělesová turbína



Obr. 2.7: Jednostupňová turbína Siemens(převzato z [42]).

3 Teslova turbína

Jedná se o speciální typ turbíny, který byl vynalezen N. Teslou v roce 1909. Pozoruhodné na této turbíně je, že na svém oběžném kole nemá žádné lopatky. Díky této konstrukci je možné tuto turbínu pohánět všemi typy médií, poradí si s kapalinou i plynem. Když Tesla tuto turbínu vynalezl, považoval ji za převratnou, protože tato turbína teoreticky umožňovala dosahovat maximální účinnosti již při malých průtocích. Bohužel se ukázalo, že v praxi má tato turbína velice nízkou účinnost, a to někde okolo 30-40 %, proto se nikdy nezačala používat v širší praxi. V dnešní době se opět začínají dělat pokusy s touto turbínou, protože její teoretické vlastnosti a robustní konstrukce by byly vhodné pro domácí vodní elektrárny. Další výhodou této turbíny je, že umí pracovat i v obráceném režimu, kdy zvládá nasávat kapalinu, a tedy pracovat jako čerpadlo. Jak je vidět na obrázku 3.1, částice se pohybují po kružnici, délka dráhy částic látky se mění se zatížením zařízení. Čím více je turbína zatížena, tím po kratší dráze se částice pohybují [24].

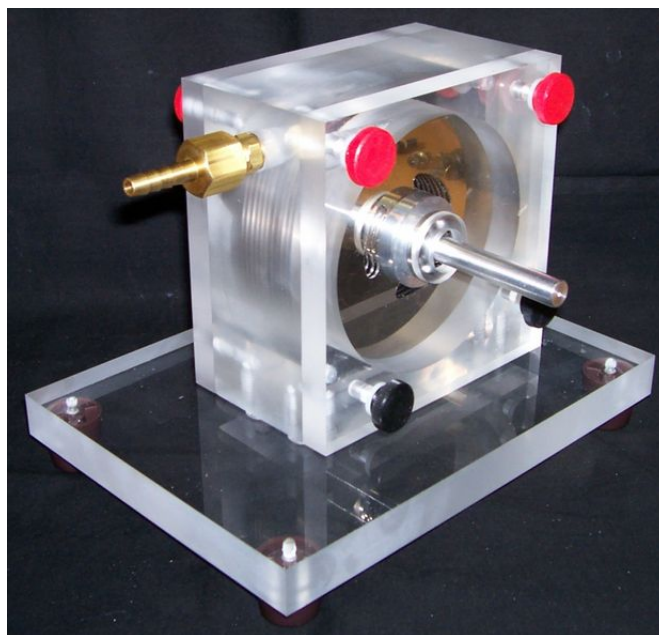


Obr. 3.1: Princip pohybu částic v Teslově turbíně(převzato z [25]).

3.1 Teslův model

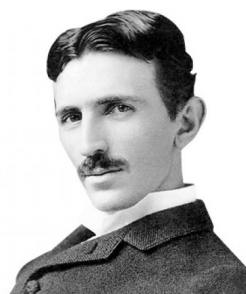
Při návrhu si Tesla představoval, jak se bude turbína používat ve většině světových odvětví, a to jak v aviatice, automobilismu, tak v elektrárnách. Proto sestavil vlastní model, na kterém chtěl svůj úspěch prezentovat na turbíně poháněné párou. Tato turbína měla průměr 22,5 cm a tloušťku 5 cm a při těchto rozměrech

měla vyvinout výkon 110 koňských sil. Předpokládaná účinnost byla okolo 90 %, což se bohužel nepotvrdilo. Problém byl v pevnosti tenkrát dostupné oceli, protože nebylo technologicky možné udělat tak tenké ocelové pláty, bez toho, aniž by se nezačaly prohýbat, což vedlo k víření a snižování účinnosti. To byl asi jeden z hlavních důvodů, proč se tato turbína nikdy komerčně neprosadila [26]. Na obrázku 3.2 je ukázána jedna z podomácku sestavených turbín.



Obr. 3.2: Hotový model Teslovy turbíny(převzato z [27]).

3.2 Nikola Tesla



Obr. 3.3: Nikola Tesla(převzato z [28]).

Nikola Tesla (obrázek 3.3) byl vědec, matematik a fyzik, který se narodil 10. července 1856 v Chorvatsku a zemřel v New Yorku 7. ledna 1943. Po gymnáziu studoval na polytechnice ve Štýrském Hradci, poté šel studovat na Karlovu univerzitu, kde se seznámil a byl ovlivněn českým fyzikem Ernstem Machem. Karlovu univerzitu ale nedokončil z důvodu smrti otce.

Poté začal pracovat jako inženýr pro telegrafní společnost v Budapešti. Při této práci se věnoval vlastnímu výzkumu, během kterého objevil princip fungování střídavého proudu. V roce 1882 dostal nabídku práce v Paříži pro společnost Thomase Edisona. Tesla tuto nabídku přijal. V 1884 se Tesla přestěhoval do USA, kde začal spolupracovat s Edisonem, který byl již v té době známým vynálezcem. Tesla nějakou dobu pro Edisona pracoval a vylepšil několik jeho zařízení, avšak po velkých neshodách Tesla opustil Edisonovu společnost a založil vlastní konkurenční společnost s názvem Tesla Electric Light & Manufacturing. Jak název napovídá, firma vyráběla obloukové lampy. Tesla měl v plánu zaměřit se na střídavý proud, to se ale nelíbilo dozorcům radě a byl z firmy propuštěn. Poté začal pracovat pro amerického inženýra G. Westinghouse. V roce 1887 objevil princip generování točivého magnetického pole, což mu umožnilo vynalézt asynchronní motor. Díky tomuto motoru se mohl vrhnout na tvoření sítě střídavého elektrického proudu. Poté se začal věnovat rádiovým přenosům a v roce 1893 předvedl svůj radiokomunikační přístroj. V následujících letech objevil spoustu vynálezů, některým z nich nepřikládal důležitost, a tak je nepublikoval. Dále se také prohluboval jeho spor s Edisonem, který je znám jako tzv. „válka proudů“. Tesla se snažil prosadit využití střídavého proudu, ale Edison se snažil tuto technologii zastavit, protože veškeré jeho příjmy byly z jeho zařízení pracujících na síti stejnosměrné. Tesla nakonec uspěl a firma Westinghouse Electric Corporation postavila elektrárnu na Niagarských vodopádech. O výrobu střídavé energie se zde staraly asynchronní motory.

V následujících letech se Tesla věnoval možnostem přenosů elektrické energie bezdrátově. Když sehnal sponzora pro svůj projekt, začal se stavbou tzv. Wardenclyffské věže, tato věž měla měřit 57 m a měla umožnit distribuci bezdrátové elektrické energie na velké vzdálenosti. Jenže jeho sponzorům došla po několika letech trpělivost a přestali projekt dál podporovat, Tesla již dalšího sponzora nenašel, a tak byla v roce 1917 věž stržena. Tesla se také na začátku 20. století soudil s G. Marconim o vynález rádia, protože Marconi za tento vynález dostal Nobelovu cenu. I přesto, že měl Tesla nevyvratitelné důkazy svého prvenství, byl tento spor uzavřen až v roce 1943 po Teslově smrti v jeho prospěch. Tesla nadále vynalézal a v roce 1909 podal žádost o patent na svoji bezlopatkovou turbínu. Jeho poslední patent mu byl uznán 3. ledna 1922.

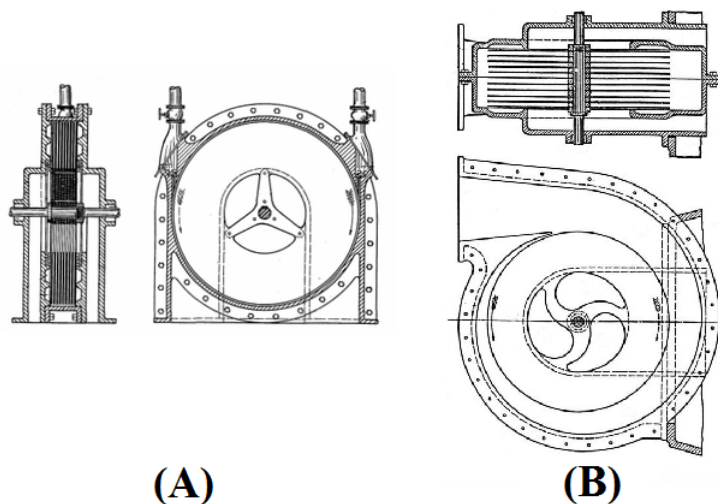
Ke konci života ho lidé považovali spíše za podivína než za vědce, protože předpovídal bezdrátový přenos hlasu, obrazu a textu, dále již v této době začal uvažovat o umělé inteligenci. V dnešní době je Tesla považován za jednoho z největších vynálezců a průkopníků naší historie [29].

3.3 Patent

Ačkoliv Tesla zažádal o patentování své turbíny již v roce 1909, patentový úřad mu patent přijal až v roce 1913. Kromě patentu na turbínu si také Tesla patentoval čerpadlo, které konstrukčně vychází z jeho turbíny, ale obsahuje jisté modifikace. V patentech je popsán přesný popis funkce zařízení. Na obrázku 3.4 jsou zobrazeny Teslovy návrhy z jeho patentů.

Úryvek z patentu: Je třeba zvážit činnost zařízení, při které je užitá kapalina k pohonu zařízení, a síly, které působí na hřídel, pokud se oběžné kolo otáčí po směru hodinových ručiček. Prozatím zanedbejme vlastnosti konstrukce, které zvyšují nebo snižují účinnost pumpy, které se odlišují od turbíny. Kapalina díky svým vlastnostem (přilnavost a viskozita) při vstupu přes přivaděč přichází do styku s disky. Kapalina působí na disky pomocí dvou sil, a to síly tangenciální ve směru otáčení a síly radiální ve směru k výstupu z turbíny. Kombinací působení těchto sil dochází ke zvyšování rychlosti kapaliny, a to po spirálové dráze, dokud se nedostane k výstupu z turbíny, kterým je vytlačena ven. Spirálový pohyb je přirozený a jeho vlastnosti závisí na vlastnostech kapaliny. V závislosti na použité kapalině se také mění rychlost a změny pohybu proudění, což je podstatným prvkem fungování turbíny.

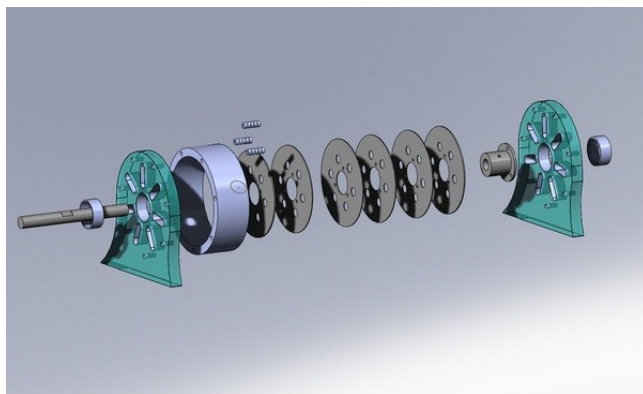
Lze s přesností určit, po jak velké dráze a kolik otáček udělá kapalina od vstupu po výstup z turbíny, a to pomocí výpočtů. Při těchto výpočtech je potřeba znát počet otáček, kterých je potřeba pro obměnu veškeré kapaliny v turbíně, vynásobené rychlostí kapaliny a průměrem disků v turbíně. Bylo zjištěno, že množství kapaliny, které je poháněno tímto principem, je přímo úměrné rychlosti oběžného kola a efektivní ploše disků. Proto se výkon a účinnost těchto zařízení zvyšuje s rychlostí otáčení hřídele a s rostoucí velikostí turbíny [30].



Obr. 3.4: (A) Teslova Turbína, (B) Teslovo čerpadlo((A) převzato z [31], (B)převzato z [32]).

3.4 Konstrukce turbíny

Turbína má poměrně jednoduchou konstrukci, skládá se z poloduté hřídele, disků nahrazujících lopatky a vstupního přívodu. Disky jsou nasazeny na hřídel, která je z obou stran uložena ve dvou ložiscích, které jsou uloženy ve skříni. Disky musí být vystředěny a musí být ve stejné rozteči od sebe, tak aby byly všechny mezery mezi disky stejně velké, k tomu v turbíně slouží distanční podložky. Na nepropustné straně hřídele je třeba použít převodovku pro připojení poháněného zařízení a dutou část připojenou na pevné ložisko a na něj lze připojit odvodné potrubí [33]. Na obrázku 3.5 je vidět jeden z možných návrhů Teslovy turbíny.



Obr. 3.5: Rozložená Teslova turbína(převzato z [34]).

3.5 Fyzikální jevy

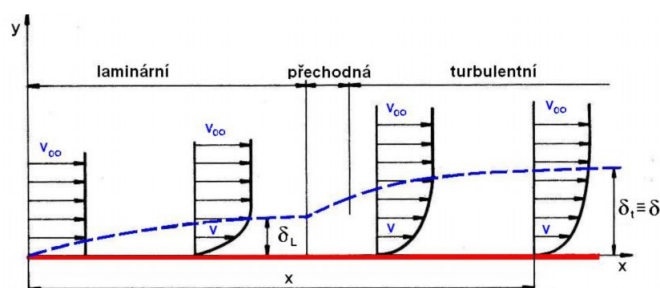
3.5.1 Mezní vrstva

Pojem mezní vrstva se dá názorně vysvětlit na příkladu obtékání rovinné desky umístěné v rovnoběžném proudu tekutiny, přičemž deska má stejný směr jako proudnice – Obrázek 3.6.

Částice tekutiny před deskou mají všechny stejnou rychlost v^∞ i směr. Částice, které ulpí na desce mají rychlost nulovou, v blízkosti desky jsou částice tekutiny bržděny pomalejšími částicemi u obtékaného povrchu. Část jejich kinetické energie se přeměňuje třením na teplo. Oblast v těsné blízkosti stěny desky, kde se mění rychlost neboli tam, kde existuje gradient rychlosti, a tedy platí nerovnost, se nazývá mezní vrstva.

Rychlostní profil v náběžném bodě má obdélníkový průběh, dále od náběžného bodu ve směru „x“ v důsledku viskozity (tření) je rychlost tekutiny na stěně desky nulová a kolmo na desku ve směru „y“ se vytváří rychlostní profil. Tření na desce stále zbrzdí částice tekutiny, další částice vzdálenější od povrchu se přenášejí do mezní vrstvy. Protože do mezní vrstvy vstupují další částice tekutiny, mezní vrstva směrem po proudu stále narůstá. Rychlostní profily mají spojitý přechod od nulové rychlosti na stěně do plné rychlosti ve vnějším proudu – Obrázek 3.6.

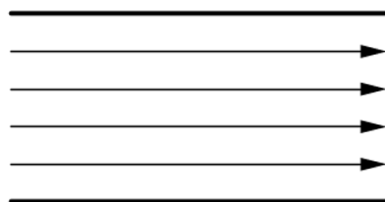
V dostatečné vzdálenosti od náběžné hrany jsou si rychlostní profily podobné a nezávislé na vzdálenosti x . Má-li nabíhající proud nulovou turbulenci, vzniká na začátku desky laminární mezní vrstva, která přechází v mezní vrstvu turbulentní s laminární podvrstvou. Mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou existuje jistá přechodná oblast. Mezní vrstva podle druhu proudění může být laminární nebo turbulentní [35]. Princip mezní vrstvy můžeme vidět na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: Mezní vrstva (převzato z [36]).

3.5.2 Laminární proudění

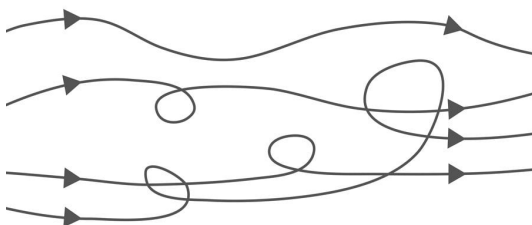
Laminární proudění je proudění Newtonské kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice kapaliny se pohybují vedle sebe ve vrstvách, které se vzájemně nepromíchávají. Mezi jednotlivými vrstvami se předpokládá existence vnitřního tření. Při laminárním proudění lze zanedbat drsnost povrchu, protože se neprojevuje. Drsnost povrchu ovšem urychluje přechod laminárního proudění na proudění turbulentní. Laminární proudění platí pouze pro malé rychlosti kapaliny, protože při těchto rychlostech se víry nedokáží projevit [35]. Ukázku laminárního proudění můžeme vidět na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Laminární proudění(převzato z [37]).

3.5.3 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění je proudění Newtonské kapaliny, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Částice tekutiny vykonávají při proudění kromě posouvání i vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Rychlosti jednotlivých částic tekutiny se nepravidelně mění, proudění tedy není stacionární. Do turbulentního proudění je třeba započítat vliv drsnosti povrchu, se kterým je kapalina ve styku. Pro vznik turbulentního proudění je třeba vyšších rychlostí protékající kapaliny [35]. Ukázku turbulentního proudění můžeme vidět na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Turbulentní proudění(převzato z [38]).

3.5.4 Třecí ztráty

Třecí ztráty jsou způsobeny vlastností média s názvem viskozita. Viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění kapaliny. Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Předpokládáme, že kapalina lpí na obou deskách, takže její rychlost je na stojící desce nulová a na pohybující se desce rovna rychlosti pohybu desky [35].

3.6 Využití

Teslova turbína se dodnes nerozšířila, což je způsobeno její nízkou účinností, která je způsobena její velice, na přesnost výroby, náročnou konstrukcí. Pokud by se povedlo odstranit neduhy, jako jsou rázy přitékající kapaliny na disky a tvorby vírů v pohybu částic po disku, tak věřím, že by se turbína začala využívat.

Pro představu by se mohla využívat jako generátor v tepelných a jaderných elektrárnách. Díky své možnosti fungování v reverzním režimu by si našla uplatnění i v přečerpávacích elektrárnách. Její hlavní uplatnění ovšem vidím ve využití jako malá vodní domácí elektrárna, protože turbína je nenáročná na množství protékající vody a také je více méně nezničitelná, protože se v turbíně po vniknutí předmětu nemá co ulomit. Turbína se pouze zasekne a po vyčištění bude opět funkční.

Při vhodném návrhu turbíny tak, aby na výstupu byl požadovaný tlak, by se turbína mohla využívat jako redukční tlakový ventil na plynovém potrubí rozvodu tepla. Kde by se při snižování tlaku využilo jeho energie k výrobě elektrické energie a tím by šlo zvýšit účinnost celé tepelné soustavy. Běžný tlakový ventil totiž přebytečný tlak pouze vypustí.

Když Tesla vynalezl tuto turbínu, představoval si, že by se mohla turbína využívat jako pohon vozidel, měla být poháněna párou, kdy i při svých malých rozměrech dokázala vydat velký výkon. To však bylo na začátku 20. století, kdy teprve začínaly spalovací motory. V dnešní době by se dala turbína využít v turbo ústrojí vozidel nebo by se mohla využívat u hybridních vozidel, kdy by byla poháněna výfukovými plyny a tím by se dobíjely baterie, ovšem toto řešení je značně komplikované, protože by bylo nutné výfukovou část opět zpětně natlačit, aby spaliny mohly volně plynout ven z vozidla. Čili by auto potřebovalo jak turbínu, tak kompresor a dále by se to neobešlo bez čidel řešících průtok a tlak spalin plus příslušné řídicí jednotky atd.

4 Porovnání turbín

Tab. 4.1: Porovnání turbín.

turbíny	teor. účinnost [%]	savost [l/s]	spád [m]	hnací medium
Peltonova	95	max 34000	až 200	kapalina
Turgo	90	max 3200	až 300	kapalina
Bankiho	84	max 2000	až 30	kapalina
Francisova	90	max 8000	až 700	kapalina
Kaplanova	90	max 30000	až 700	kapalina
Deriazova	90	max 55000	až 1000	kapalina
Teslova	95	-	-	kapalina/plyn

Jak je vidět z tabulky 4.1, tak Teslova turbína by měla mít teoreticky s Peltonovou turbínou největší účinnost, avšak v praxi toto neplatí, protože vnitřní konstrukce Teslovy turbíny je velice náročná na výrobu, a proto se testované modely dostaly na účinnost okolo 50 %. Nesporná výhoda Teslovy turbíny je možnost jejího fungování při pohonu plyny, což umožňuje její využití v tepelných elektrárnách. Nikde jsem ovšem nenalezl informace o hltnosti ani o maximálním spádu této turbíny, což příkládám tomu, že se turbína nikdy nezačala používat v praxi, a tak se tyto testy neprováděli. V dnešní době patří k nejpoužívanějším turbínám turbíny Peltonova, Francisova a Kaplanova.

V tabulce jsou uvedené jak turbíny rovnotlaké, tak turbíny přetlakové. U přetlakových turbín se využívá ve většině případů větších spádů než u turbín rovnotlakých.

5 Aditivní technologie

Tato kapitola je zaměřena na 3D tisk, protože v rámci diplomové práce bude značná část dílů vyráběna touto technologií. Z tohoto důvodu je zde popsáno, jak tato technologie funguje, jaké jsou typy této technologie a jaké je jejich uplatnění.

Začátky užívání aditivních technologií v průmyslu sahají do 90. let minulého století, technologie byla ovšem úplně odlišná, využívalo se UV laserů a fotopolymery. Jednalo se ovšem o velice drahou techniku a tak se rozšířila pouze do velkých technických firem. Obrovský boom 3D tisku nastal v minulém desetiletí, kdy vznikla technologie polyjet, tedy 3D tisk, jak jej dnes známe. Jedná se o technologii, která využívá digitálních 3D modelů, z těchto dat je poté vytisknut fyzický 3D model. Jedná se o aditivní technologii, kdy se model tiskne po vrstvách.

Pro tvorbu modelů se využívá buďto CAD programů, ve kterých se části vytvoří a poté uloží ve vhodném formátu, to umožňuje vytvořit libovolné tvary, nebo 3D skener, který dokáže z již hotových předmětů vytvořit data pro následující tisk [39]. Při návrhu modelu pro 3D tiskárnu je třeba počítat s maximálními rozměry, které dokáže tiskárna vytisknout, pokud je díl příliš veliký, je třeba díly tisknout po částech a ty následně spojit dohromady.

Existuje spousta druhů 3D tiskových technologií, které nachází uplatnění prakticky ve všech odvětvích našich životů. Zmínit lze tisk platů, tisk fotopolymery, tisk kovů a nebo biologický tisk.

5.1 FDM

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších druhů tisku a to jak v profesionální sféře, tak mezi domácími tiskaři. Jedná se o technologii, při které se taví převážně plastové vlákno (může být i kovové) uvnitř tiskové hlavy, která natavený materiál nanáší na podložku v tenkých vrstvách. Existuje několik kombinací pohybů, kdy se buď využívá pouze pohybu tiskové hlavy, případně se kombinuje s pohybem podložky. Díky pohybu v ose Z pak dochází k nanášení dalších vrstev, až dojde k vytisknutí celého produktu. U složitějších tvarů, které jsou volně v prostoru, je třeba tisknout podpěry, tak aby se tato část udržela. Jako možnou nevýhodu lze brát, že vytištěný objekt nikdy nebude úplně hladký, avšak lze tohoto stavu dosáhnout dodatečnou úpravou povrchu. Na obrázku 5.1 je vyobrazena poloprofesionální tiskárna od českého výrobce Prusa Research [43].

Při tisku plastů se užívají termoplasty. Nejběžněji využívané materiály jsou PLA (polylaktid) a ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), ale existuje ohromná paleta dal-

ších materiálů, které například mohou obsahovat dřevěná či kovová plniva nebo to mohou být i elastomery.



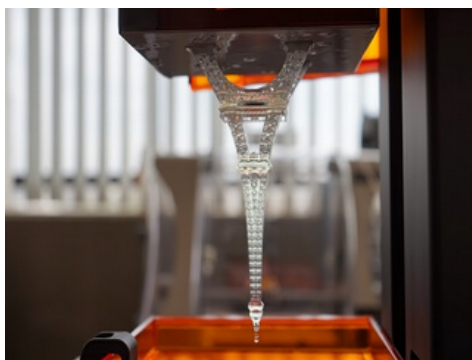
Obr. 5.1: 3D tiskárna Prusa i3 MK3(převzato z [40])

5.2 SLA

Jedná se o technologii, kde dochází k vytvrzování fotopolymeru za pomoci laseru. Na trhu je ještě prakticky totožná technologie s označením DLP, kde se využívá pro vytvrzování LED projektoru.

Tiskárna tiskne po tenkých vrstvách, kdy se osvětluje malá vrstvička tekutého polymeru. Zachytávání osvětleného polymeru probíhá na tenké membráně, při tisku dochází k postupnému vytahování vytištěného tvaru z nádoby s polymerem. Toto můžete vidět na obrázku 5.2. Je proto třeba myslet i na to, že pokud se tiskne uzavřený objekt, tak v něm může polymer zůstat a je třeba udělat vhodný otvor.

Největší předností této technologie je, že vytištěné výrobky jsou velice hladké a detailní, navíc jsou i více odolné, protože se neskládají z jednotlivých vrstev, ale jedná se jednolitý materiál [44].



Obr. 5.2: Výtisk vytištěný pomocí SLA tiskárny(převzato z [45])

5.3 SLS

Technologie fungující na principu selektivního spékání práškového materiálu laserem. Prášek může být jak kovový, tak plastový. Tisk probíhá tak, že se nejprve nanese vrstva prášku, na který se poté osvítl požadovaný tvar výrobku laserem a přetaví se, tím dojde k jeho spojení, poté se celá plocha sníží a nanese se další vrstva prášku a tak dále. Výhodou je, že okolí je vždy vyplněné práškem, a tak není třeba tisknout podpory při převisech. Stejně jako u SLA pokud jde o uzavřený objekt, je třeba vyřešit jak z něj přebytečný prášek vysypat. Přebytečný nepřetavený prášek se poté profiltruje a je možné ho opět použít.

Tímto způsobem výroby lze nahradit strojní obrábění, avšak jedná se o velice drahou technologii, neboť cena výtisků většinou mnohonásobně převyšují cenu obrobku, výrobky lze vidět na obrázku 5.3. Ovšem tímto způsobem je možné dosáhnout složitých struktur, které by jinak nešly vyrobit [46].



Obr. 5.3: Výrobky vytištěné pomocí SLS technologie(převzato z [47])

6 Návrh turbíny

Jak vyplývá z předchozího textu, největším neduhem této turbíny je její reálná nízká účinnost, to je ovšem způsobeno nutností přesné konstrukce. Další z problémů je nutnost laminárního proudění média na vstupu zařízení, dále dochází k velkým ztrátám v místě, kde vstupuje hnací médium na disky a zde se promíchává s médiem, které je již v těle turbíny a poslední místo, kde dochází k poměrně velkým ztrátám je výstupní polodutá hřídel, kde se výstupní médium promíchává a víří. Proto se při vlastním návrhu budu snažit těmto ztrátám co nejvíce předejít a eliminovat je.

Jako základní podmínku při návrhu jsem si stanovil velikost průměru disků 25 cm. Z tohoto rozměru poté vychází rozměry ostatních částí mojí turbíny. Další věc, která při návrhu tohoto zařízení hrála velice důležitou roli, bylo hnací médium. Z důvodu jednodušší prezentovatelnosti jsme se rozhodli jako hnací médium využít vzduch.

6.1 Konstrukce

s Když si představíme takové zařízení, jako je Teslova turbína, člověka ihned nemusí napadnout, kolik částí vlastně takové zařízení může obsahovat součástí a všechny tyto součásti je třeba upravit podle využití daného zařízení.

Při návrhu a zvolení vhodné konstrukce jsem se rozhodl vycházet z kombinace konstrukcí Teslova čerpadla a turbíny a tím dosáhnout co nejlepších parametrů, a také jsem se snažil konstrukci turbíny co nejvíce zjednodušit při udržení dobrých vlastností. Je ovšem nutno si uvědomit, že i když tato turbína má dvojí režim fungování, fungování jako turbína a jako čerpadlo, tak nelze dosáhnout s jedním zařízením obou těchto špičkových vlastností, to jest účinná turbína nebude účinné čerpadlo a naopak.

6.1.1 Návrhový program

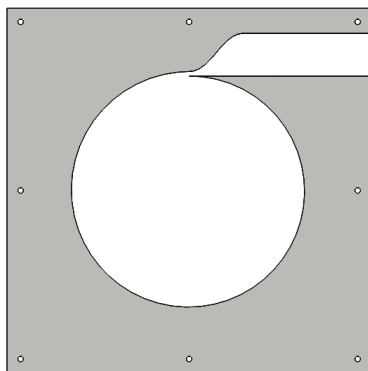
Při návrhu práce jsem se rozhodl využívat návrhový 3D CAD program SolidWorks. Tento program je komplexní, protože umožňuje tvorbu jednotlivých dílů a skládání modelů, vytváření výkresové dokumentace splňující potřebné normy a také provádění simulací vlastností a chování zařízení.

6.1.2 Tělo

Jedná se o jeden z nejdůležitějších dílů celého zařízení, protože obsahuje dýzu a prostor, ve kterém jsou vloženy disky usazené na hřídeli. Místo běžné tangenciální dýzy moje řešení vychází z křivky Bernoulliho lemniskáty. Tato křivka má nejlepší sklon pro vstup vzduchu do turbíny, tato část by měla být vyleštěna, aby mohlo médium co nejlépe klouzat po povrchu těla. Návrh tvaru dýzy se provádí tak, že si určíme nejprve vstupní rychlost média. Tato rychlost musí mít svoji hodnotu nižší než je Machovo číslo, aby zde nedocházelo k rázové vlně. Proto jsem si určil vstupní mezeru 5 mm, při této mezeře bychom se měli dostat k blízkosti Machova čísla, avšak nedojde k jeho překročení.

Pak zde máme prostor pro disky, který nemá kruhový tvar. Vnitřní prostor má tvar Archimédovy spirály. Tato křivka zde slouží k tomu, aby pohonné médium nevcházelo kolmo na plochy disků, ale aby se médium již před vstupem na disky dostalo do spirálovitého pohybu a vstupovalo pod co nejmenším úhlem na plochu disků a tím eliminovalo rázy. Celý model těla můžeme vidět na obrázku 6.1. Jednotlivé body této křivky byly vypočítány pomocí rovnice:

$$R_{spir} = r_{poč} + \varphi * h_{výstup} / 2\Pi \quad (6.1)$$



Obr. 6.1: Model těla turbíny

Další části těla jsou poté boční stěny, které slouží jako zakrytí ze stran, na bočních jsou poté umístěné ještě menší nástavby. Ve všech těchto částech jsou otvory pro uložení a šrouby. Všechny tyto části společně s tělem budou muset být spojeny a utěsněny tmelem, aby přes ně nemohl unikat vzduch.

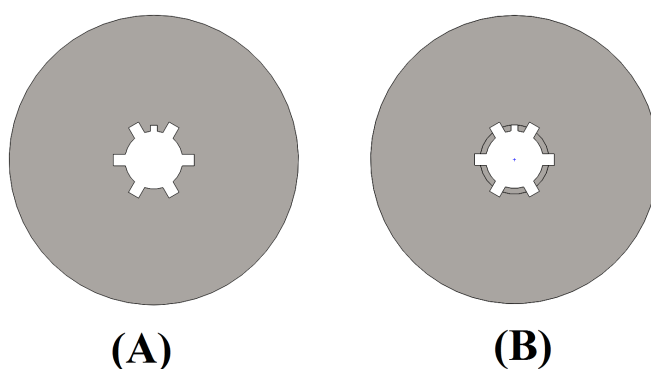
6.1.3 Disky

Jak již bylo řečeno, disk představuje plochu, na které pohonné médium předává svoji energii. U disků hraje největší roli jejich počet, šířka a mezery mezi nimi.

Při návrhu počtu disků je třeba vycházet z vlastností hnacího média. Dá se říct, že počet disků může být náhodný, je třeba se pohybovat v hodnotách okolo pěti až dvaceti disků s přihlédnutím k celkovým rozměrům a maximální hltnosti turbíny. Šířky disků a mezer mezi nimi mají být co nejmenší. V mém případě se v turbíně nalézá 16 disků, tloušťka jednoho disku je 1,4 mm, mezera mezi disky má také šířku 1,4 mm. Tyto hodnoty jsou zvoleny v rámci vyrobitelnosti zařízení.

V mé práci jsou použité dva různé druhy disků. Jeden typ disku je pouze plochý, s drážkou pro péro a šesti otvory, které propojují výpustné otvory u disků, aby se zde vyrovnala rychlost a tlak. Druhý typ disku obsahuje stejný počet otvorů a drážku pro péro, ale dále jsou na něm okolo středu výstupky, které nahrazují distanční podložky a vymezují tak námi danou mezeru mezi disky. Modely disků si můžeme prohlédnout na obrázku 6.2.

U většiny modelů této turbíny, které naleznete na internetu, si můžete všimnout, že ještě vymezují mezeru mezi disky uprostřed jejich plochy, aby nedocházelo k jejich kroucení. Já tuto variantu nepoužil, protože v těchto místech potom dochází opět ke vzniku turbulencí. Dle mého názoru to není ani potřeba, protože pokud se turbína roztočí do běžných provozních otáček, tak za pomoci působení fyzikálních sil disky zůstanou v rovné poloze bez kroucení. Tento způsob může mít výhodu pouze v případě, kdy se turbína otáčí v nízkých otáčkách.

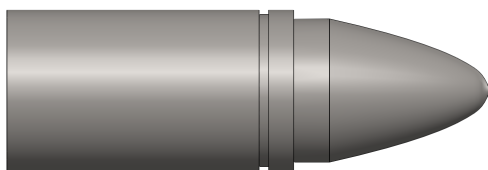


Obr. 6.2: (A)Krajní disk (B) Vnitřní disk s distančním výstupkem

Rozhodl jsem se, že budu polodutou hřídel konstruovat ze dvou částí, které se potom spojí dohromady a to proto, abys se dala hřídel dobře vyrobit. Na obou částech hřídele je drážka, která slouží pro pojistný kroužek, který vymezuje vůle hřídele a dále slouží jako pojistka ložiska

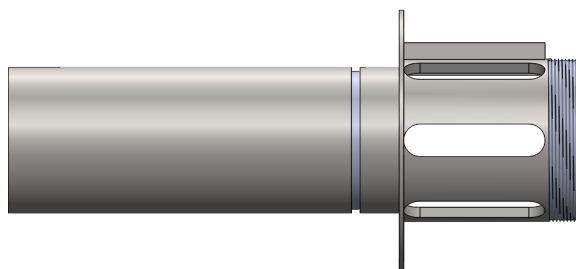
První část je tedy z plného materiálu a z jedné strany je opatřena kuželem. Tato část se bude vsouvat do prostoru, z kterého bude vycházet vzduch ven z turbíny. Tento kužel v hřídeli slouží k tomu, aby médium vycházející ven z turbíny proudilo po co nejvíce rovné dráze a nedocházelo ke srážkám a k turbulencím. Tvar tohoto kuželu je navržen tak, aby se plocha kuželu rovnala ploše nad kuželem, dále je možnost přesně popsat spojnicí trendu ve tvaru polynomu šestého stupně. Dále jsem si pro výpočet určil, že vnitřní průměr hřídele bude 40 mm a vnější průměr duté části bude 50 mm. Tuto část hřídele můžete vidět na obrázku 6.3. Tvar kuželu byl vypočítán pomocí vzorce:

$$R_{kužel} = \sqrt{r_{-1}^2 - R_{hřídel}/2} \quad (6.2)$$



Obr. 6.3: Plná část hřídele

Druhá část hřídele je tedy polodutá a slouží k odtékání média ven z turbíny. Na hřídeli je rozšířená část, která obsahuje šest drážek, přes které odtéká médium pryč z prostoru disků, dále je na této části péro, které slouží k tomu, aby se disky na hřídeli neprotáčely. Dále je na hřídeli kotouček, o který se z jedné strany disky zapřou, na druhé straně je závit, na který se bude šroubovat pojistný kroužek, kterým se disky na hřídeli stáhnou k sobě. Model hřídele můžete vidět na obrázku 6.4. Je poměrně důležité, aby vnitřní plochy byly leštěné a tak snižovaly odpor médiu.

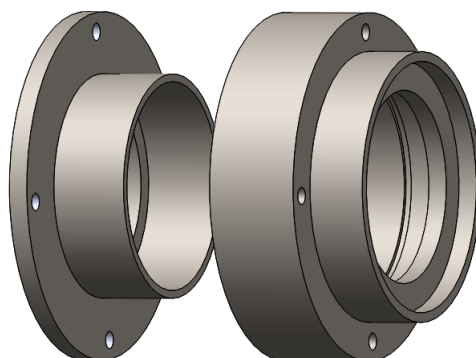


Obr. 6.4: Dutá část hřídele

6.1.4 Uložení

Jedná se o díl, ve kterém jsou uložena ložiska a gufera. Skládá se ze dvou částí a to z těla a víčka. Celý tento díl poté v sobě nese hřídel s disky, takže je třeba zajistit souosost celé této soustavy s osou těla turbíny, aby nedocházelo ke tření dílů o sebe.

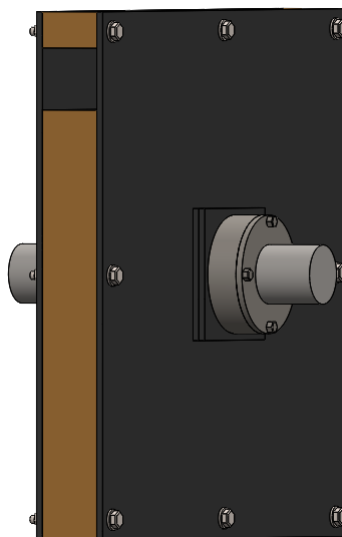
Tělo uložení se vkládá do otvoru v boční stěně. Do uložení se poté vkládá ložisko, které je zde zajištěno pojistným kroužkem. Z druhé strany je poté uložení zakryto víčkem, ve kterém jsou vložena těsnící gufera. A vše je staženo k tělu pomocí šroubů. V mém návrhu používám nesymetrické uložení a to z důvodu pojistného kroužku, který stahuje disky dohromady, proto musí být jedno uložení delší. Modely těchto dílů můžete vidět na obrázku 6.5.



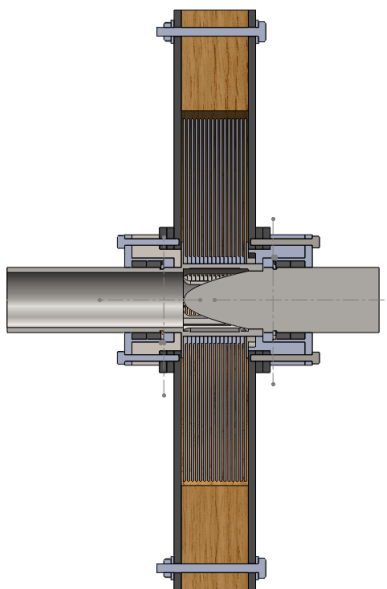
Obr. 6.5: Uložení hřídele

6.1.5 Model

Všechny díly jsem poté sestavil dohromady v programu SolidWorks, abych vytvořil model mojí turbíny. Na obrázku 6.6 můžeme vidět kompletně složený model a na obrázku 6.7 je zobrazené vnitřní uspořádání turbíny.



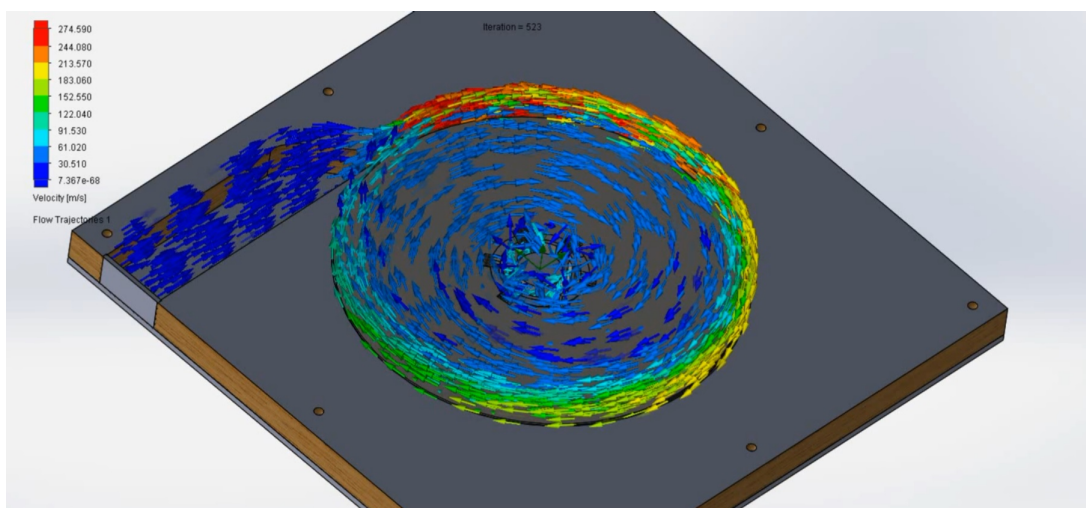
Obr. 6.6: SolidWorks model



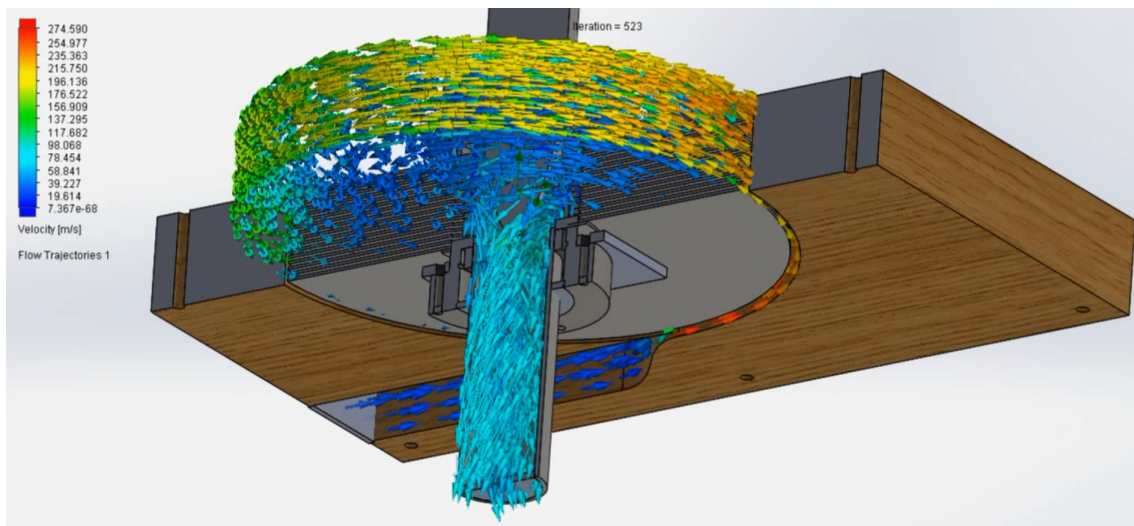
Obr. 6.7: Řez modelem turbíny

6.2 Simulace proudění

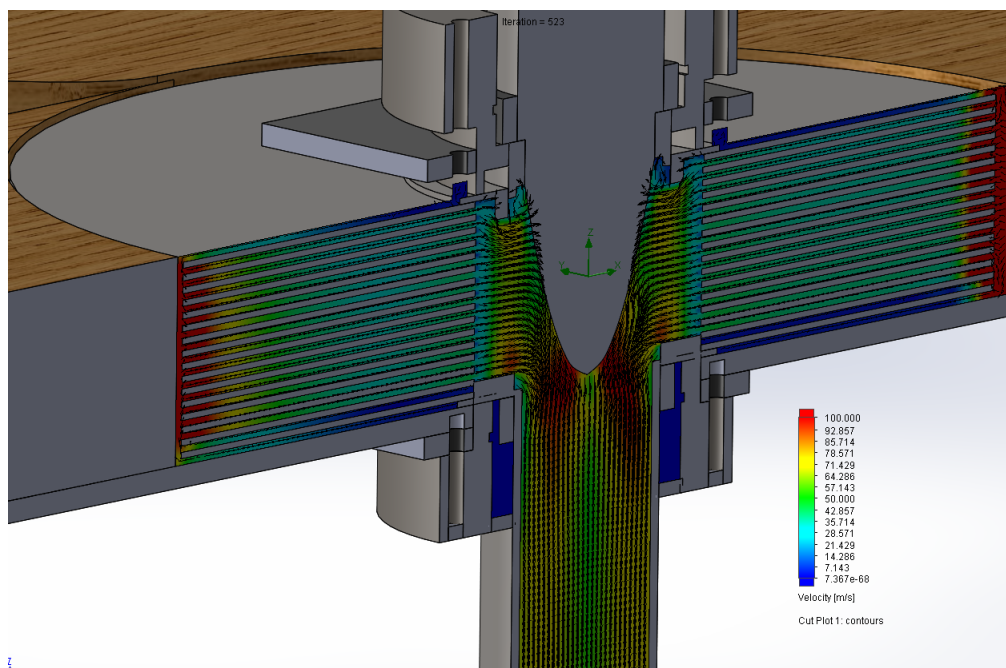
U modelu turbíny byly provedeny proudové simulace, abych zjistil, jaký vliv na proudění v turbíně mají mnou dané úpravy. Simulace jsme prováděli v programu SolidWorks. Největší problém, na který jsme narazili, bylo navrhnutí sítě modelu, protože mezi disky je malý prostor, a tak bylo nutné vytvořit velice jemnou síť, což je ovšem náročné na výpočetní výkon počítače.



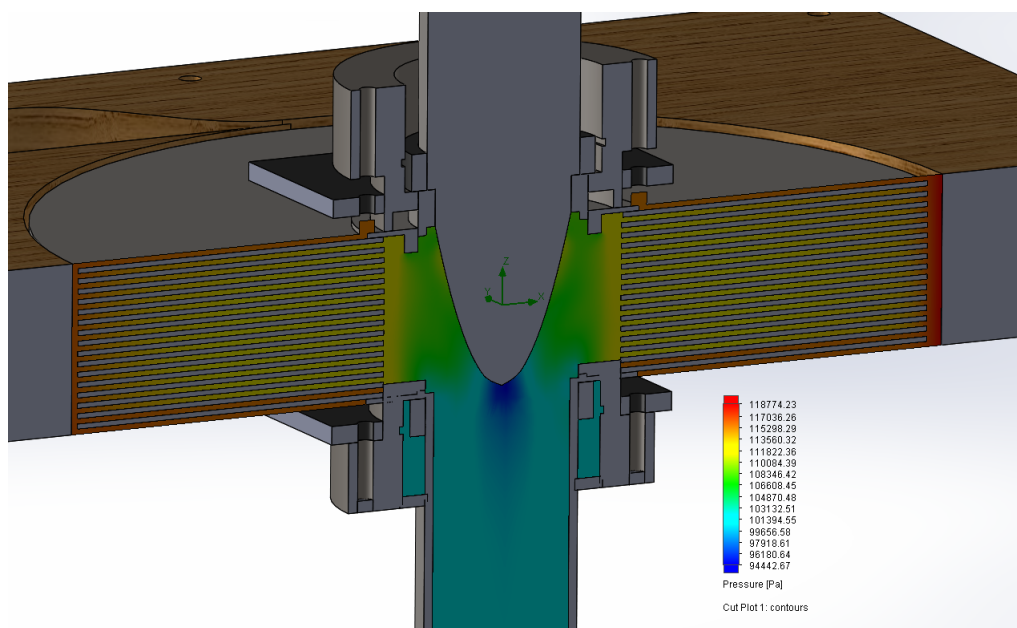
Obr. 6.8: Simulace rychlosti a pohybu média vstupu



Obr. 6.9: Simulace pohybu média výstupu



Obr. 6.10: Pohled na rychlost proudění výstupu



Obr. 6.11: Pohled na tlak média ve výstupní části

Jak je vidět na obrázku 6.8, podařilo se navrhnout vstup tak, aby nedošlo k překročení Machova čísla. Plánovaná vstupní rychlost byla okolo 270 m/s, čemuž jsme se přiblížili. Dále je vidět, že u výstupu z dýzy a vstupu vzduchu do disků nedochází k velkému promíchávání nově přichozího vzduchu a vzduchu již rotujícím v discích. Na obrázku 6.9 a 6.10 můžete vidět pohyb částic ve výstupní hřídeli. Díky vsazenému kuželu nedochází k promíchávání plynu. A díky rotování hřídele se dostává plyn do kruhového pohybu, který zajišťuje plynulý pohyb částic ven. Dále je na obrázku 6.11 vidět, že v prostoru výstupu v místě propojeném výřezy v disků se vyrovnává tlak, což umožňuje lepší odtékání vzduchu ven.

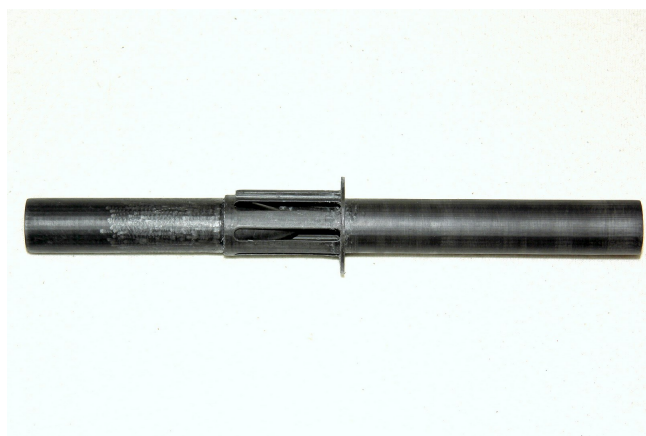
6.3 Výroba modelu

Nejprve byl vytvořen model, který měl demonstrovat konstrukci turbíny. Z časových důvodů byla zvolena kombinace 3D tisku a těla z plexiskla. Model turbíny byl oproti původního výkresu zmenšen v poměru 2:1 a to v osách X a Y, rozměr v ose Z byl zachován, protože by bylo téměř nemožné vytisknout tak tenké disky. Pro tisk jsme použili PLA plast, protože se jedná o nejběžnější typ tiskového materiálu s přijatelnými vlastnostmi.

Při sestavování vytištěných dílů se vyskytly problémy s přesností, neboť 3D tisk má své tolerance a není tak přesný jako strojní obrábění. Proto bylo nutné všechny díly, které měly přesně dosedat dohromady, vyfrézovat a zbrousit o několik desetin mm, aby vše sedělo. Další problém nastal při hledání vhodných ložisek. Protože prostor pro ně ve zmenšeném modelu není největší, musel jsem využít jehličkových ložisek bez vnější a vnitřní klece.

7 Výroba zařízení

Jako výstup bakalářské práce byl model turbíny vyrobený za pomoci 3D tisku, na kterém se otestovalo, zda je možné takto navrženou turbínu uvést do provozu. Model se povedlo roztočit na rychlost okolo 300 ot/min. Bohužel na některém z disků ulomil zobáček držící ho na svém místě, a tak vždy po nějaké době otáčení došlo k uvolnění a posunutí disku na hřídeli. Díky této závadě se turbína zasekla. Jak je možné vidět na obrázku 7.1, tak při ruční kompletaci plastového obrobku nebylo možné zaručit souosost, vhodné tolerance a přesnosti celé soustavy.



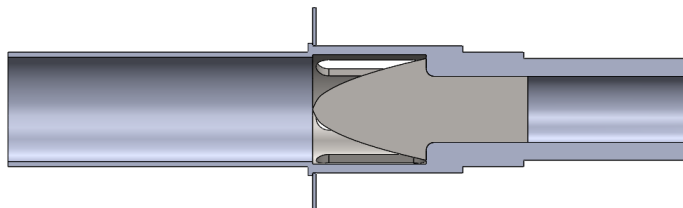
Obr. 7.1: Splený model hřídele

7.1 Úprava konstrukce

Jak již bylo v textu zmíněno, tak konstrukce této turbíny kombinuje konstrukci Teslova čerpadla a turbíny, tak aby turbína získala co nejlepších vlastností a došlo tak vyrušení některých negativních jevů, které snižují účinnost. Pro vyrobení zařízení je ovšem nutné tento návrh dále upravit a to především z důvodu vyrobitelnosti v kombinaci s omezenými finančními možnostmi. Z těchto důvodů bylo potřeba přepracovat jak samotnou hřídel s disky, tak i uložení hřídele. Asi největším ústupkem ve výrobě z důvodů financí bude snaha o to, aby tělo turbíny bylo vyrobeno na 3D tiskárně, protože takto velký díl by bylo velice finančně náročné vyrobřit frézováním. U celého zařízení je dále třeba udržet naprostou souosost, protože pokud by byla hřídel jen mírně vychýlená, tak by došlo k házení a možnému poškození turbíny.

7.1.1 Hřídel

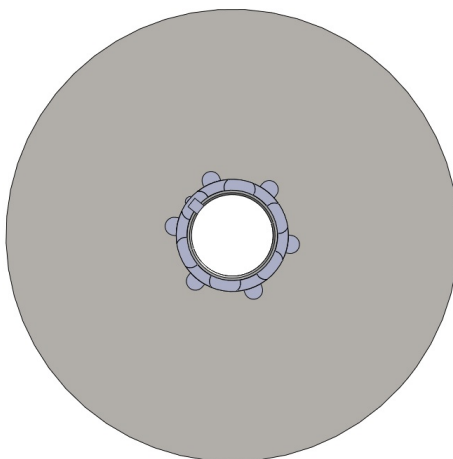
Hřídel bude vyfrézována z jednoho kusu s tím, že pero které drží disky bude na hřídel později přivařeno. Dále bude hřídel z obou stran dutá a kužel který upravuje proudění vycházejících plynů bude vytištěn na 3D tiskárně a následně vložen a ukotven. Všechny disky budou k sobě staženy proti opěrnému kroužku pomocí KM matice. Průřez modelem upravené hřídele turbíny můžeme vidět na obrázku 7.2.



Obr. 7.2: Vnitřní pohled do hřídele

7.1.2 Disky

Po technické konzultaci bylo rozhodnuto, že čtvercové výřezy v discích budou nahrazeny kruhovými otvory. Je to z toho důvodu, že vyrobení čtverce je technologicky náročné. Při nahrazení těchto otvorů kruhovými dírami by nemělo dojít ke změně vlastností, protože se stále bude jednat o otvory sloužící k vyrovnání tlaků výstupního média a také protože za polovinou poloměru disku je již jeho plocha prakticky nepodílí na sběru energie z média. Disky budou vyrobeny bez vymezujících výstupků, aby se nemusela opracovávat celá jejich plocha a tak budou všechny disky vypadat jako disk použitý jako krajní. Mezi disky bude poté vložen vymezovací kroužek vytištěný na 3D tiskárně. Ten bude navržený jako tenká membrána na které budou výstupky tak, aby vymezili mezeru mezi disky a neovlivnili fungování turbíny. Takto složený disk si můžete prohlédnout na obrázku 7.3.

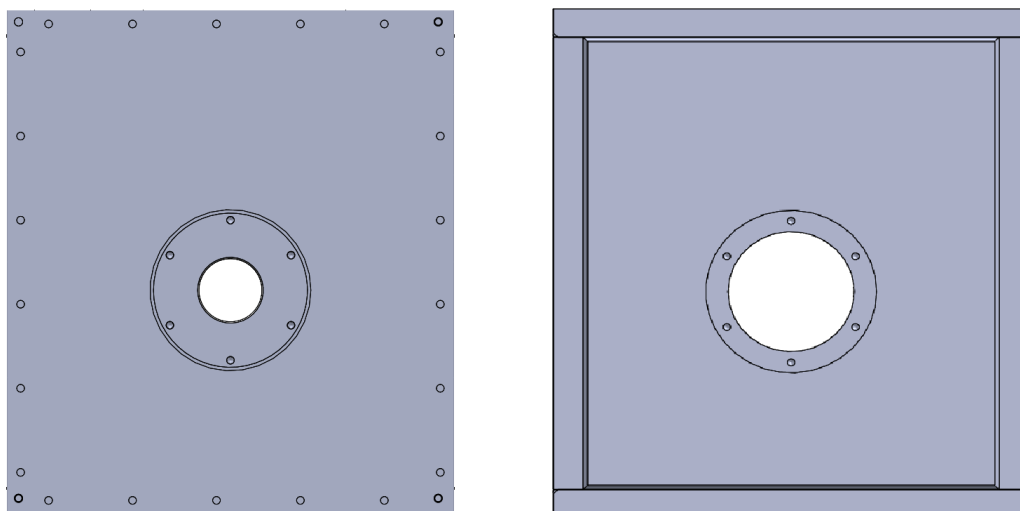


Obr. 7.3: Disk s přiloženým vymežovacím kroužkem

7.1.3 Uložení hřídele a tělo

Boční nástavby sloužící pro umístění gufer a ložisek budou vynechána a ložiska se budou nacházet v těle této turbíny a budou zaklopena víčkem. Gufera jsou úplně vynechána, neboť nejsou v hodná pro velké otáčky. Pro Teslovu turbínu jsou nejvhodnější labyrintové ucpávky, které by ovšem opět zvýšili cenu. Ložiska budou použita zakrytovaná, a těmito kryty dosáhneme jistého utěsnění. Lze ovšem předpokládat jistý únik vzduchu a tím snížení účinnosti, avšak k účelu dané práce se jedná o přijatelné řešení.

Tělo samotné se bude skládat z kovového rámu, ve kterém bude umístěno tělo vytištěné na 3D tiskárně, protože se jedná o velký kus navíc s poměrně složitým tvarem. Vnější rám je svařen z několika částí. Na tento svařenec je poté umístěna boční stěna s otvory pro šrouby, na které jsou umístěny čtyři kolíky, které slouží pro přesné vycentrování boční stěny vůči zbytku schránky. Tělo je vyobrazené na obrázku 7.4.



Obr. 7.4: Vnější konstrukce těla

7.1.4 Ložiska

Při návrhu bylo třeba zamyslet se také nad výběrem ložisek. Vzhledem k tomu, že nezatížená turbína by mohla mít i 20000 ot/min, tak bylo třeba hledat ložiska pro vysoké otáčky. Bohužel ložiska pro tyto otáčky jsou vysoce nákladná, a proto se zvolila ložiska pro nižší otáčky, avšak se stejnými rozměry, takže by v případě potřeby bylo možné ložiska zaměnit.

Byla zvolena ložiska SKF 7209 BEP, která zvládají krátkodobé zatížení okolo 9500 ot/min. Vysokootáčková ložiska, které by šla využít jako náhradní jsou poté SKF 7209 CD, které jsou stavěná na 20000 ot/min při použití tuhého mazadla (vazelína). Jedná se o kosoúhlá kuličková ložiska s kombinovaným zatížením což znamená, že dokáží přenést axiální i radiální síly působící na hřídel.

8 Měření turbíny

Pro měření turbíny bylo potřeba navrhnout prvky, které by se mohly využít pro měření zatížení turbíny. Nejdůležitějšími informacemi je tlak a teplota vzduchu na vstupu a výstupu turbíny, protože poté je možné pomocí entalpie plynu vypočítat účinnost zařízení, jako další informaci jsme se rozhodli monitorovat průtok plynu na vstupu turbíny.

Měření parametrů turbíny bude probíhat při čtyřech stupních zatížení hřídele turbíny. První stupeň je měření turbíny na prázdko, další měření bude s připojeným elektromotorkem, ten bude z RC autíčka, aby zvládl otáčky turbíny i bez nutnosti použití převodovky. Další stupeň je zatížení motorku pomocí LED diody a poslední stupeň je s připojením akumulátoru a jeho nabíjení.

Řídící MCU

Na řídící desku pro měření jsme zvolili Arduino UNO. Deska využívá mikrokontrolér ATmega 328P, která má architekturu RISC a pracuje na taktu až 20 MHz. Procesor se napájí napětím 5 V a doporučené napájení desky je 7 - 12 V. K napájení desky je možné využít buď USB konektor, a nebo konektor pro samostatný zdroj, v našem případě bude využitý zdroj 9 V. Desku Arduino Uno si můžete prohlédnout na obrázku 8.1.

Tato Arduino deska má 14 digitálních pinů a 6 analogových. Na desce je umístěn 16 MHz krystal, který slouží jako zdroj hodinového signálu. Na desce se také nachází řadič pro komunikaci desky s počítačem pomocí USB. Pro komunikaci s periferiemi lze využít buďto sběrnici SPI ¹, a nebo I2C ²[48].

¹Jedná se o sériové periferní rozhraní.

²Jedná se o master - slave sběrnici



Obr. 8.1: Arduino UNO (převzato z [49])

Zobrazovací LCD

Arduino je možné rozšiřovat o další moduly, kterým se říká shieldy. Tyto moduly se připojují na pinové lišty desky. U některých modulů je možnost skládání na sebe. V mém případě se využívá LCD shield s ovládacími tlačítky. LCD shield je vyobrazený na obrázku 8.2.

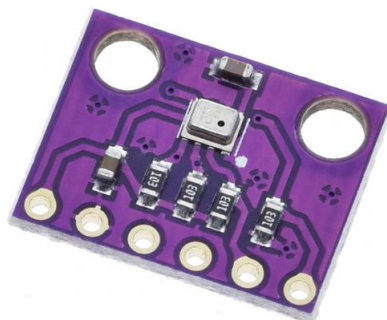
LCD shield obsahuje dvouřádkový displej o šestnácti znacích se žlutým podsvícením a šest analogově řízených tlačítek. Pro ovládání displeje se využívá šest digitálních pinů a jeden analogový pin je využit pro ovládání tlačítek [50].



Obr. 8.2: LCD Shield (převzato z [51])

Čidla pro měření dat

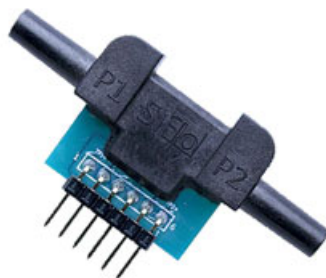
Pro měření tlaku a teploty jsem vybral modul obsahující čidlo BMP 280, který slouží pro měření teploty a atmosférického tlaku. Námi použitou desku s tímto senzorem vidíme na obrázku 8.3. Čidla komunikují pomocí sběrnice I2C nebo SPI. Firma Bosch garantuje přesnost $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\pm 1\text{ hPa}$. V mém případě jsou využita čidla dvě a komunikují pomocí sběrnice I2C. Aby mohla být zapojena obě čidla, bylo třeba přepsat adresu pomocí pullup rezistoru. Čidla využívají dva analogové piny určené pro danou sběrnici [52].



Obr. 8.3: Čidlo BMP 280 (převzato z [53])

Jako poslední čidlo je zvoleno čidlo průtoků. Jedná se o čidlo FS1012 od firmy IDT, které umožňuje měřit průtok kapalin a plynů do 10 l/min. Čidlo využívá technologii MEMS³. Jedná se o čidlo s jemným analogovým výstupem. Čidlo firmy IDT je na obrázku 8.4. Aby bylo možné data z čidla vyčítat, je třeba je zesílit pomocí operačního zesilovače, protože je ovšem využito napájení Arduina, je třeba použít nesymetricky napájený operační zesilovač a nebo si vytvořit oddělený zdroj se symetrickým napájením. Dále je třeba použít kondenzátory k odfiltrování rušení [54]. Čidlo využívá jeden analogový vstup.

³Technologie pro výrobu elektrických součástek, senzorů atd. v mikro velikostech.



Obr. 8.4: Čidlo FS1012 (převzato z [55])

Pro měření dat do diplomové práce jsou data vyčítána pomocí sériového monitoru Arduina. Turbína by ovšem měla fungovat v rámci laboratorní úlohy, a proto je na arduinu umístěn LCD shield. Na LCD shieldu je nastaveno, že po stisknutí tlačítka LEFT se zobrazí na displeji data ze vstupního čidla a to po dobu pěti sekund. Po stisknutí tlačítka RIGHT se na pět sekund zobrazí data z výstupního čidla turbíny a při stisku tlačítka SELECT se zobrazí průtok na čidlu umístěném na vstupu turbíny.

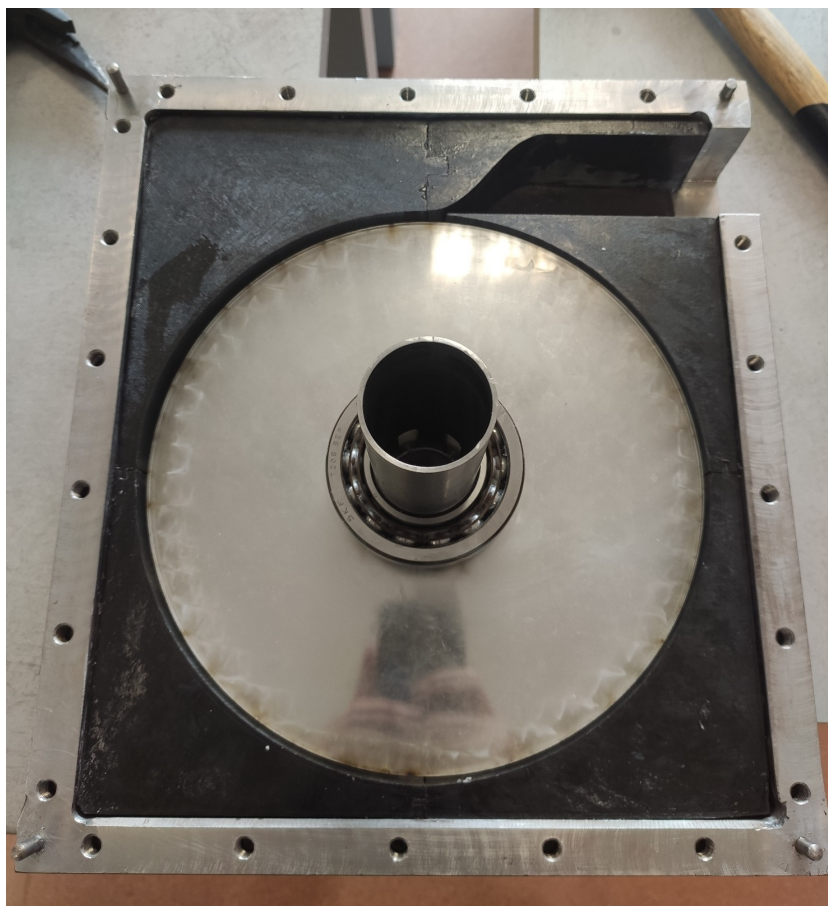
9 Sestavení turbíny

V této kapitole je ukázáno, jak probíhalo sestavování turbíny dohromady. Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, tělo, hřídel a uložení vyrobila externí firma, disky byly vyřezány pomocí laserové řezačky a zbytek dílů byl vyroben pomocí 3D tisku z materiálu PLA.

Je třeba si uvědomit, že u 3D tisku je člověk limitován velikostí tiskové plochy, a tak některé díly museli být rozděleny na vícero částí. Tím, že byly díly jen rozděleny, došlo k tomu, že bylo třeba spojované hrany opracovat tak, aby do sebe zapadly. Následné spojení a zahlazení spár bylo provedeno epoxydovou pryskyřicí.

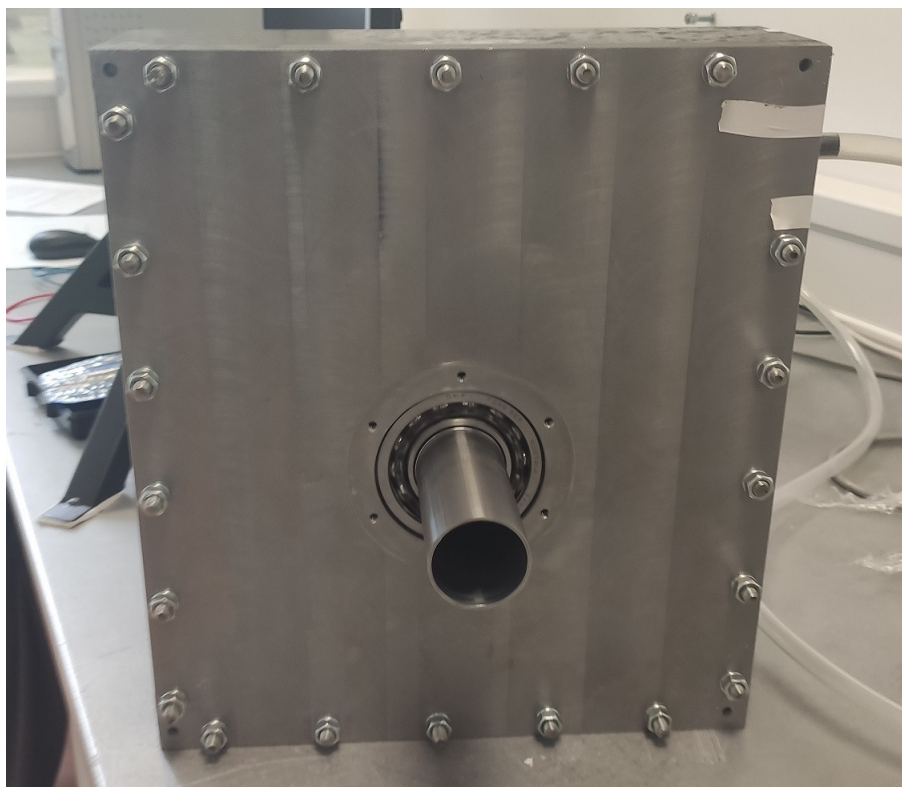
Po sestavení dílu vnitřku těla se spirálou bylo třeba usadit díl do kovového rámu. Bohužel je technicky velice náročné odstranit svár z vnitřních ploch a udělat rohy v pravých úhlech. Protože jsou díly z PLA, tak je možné je tvarovat za pomoci tepla, stačí teplota vyšší jak 60 °C a plast začne být měkký. Rám jsem tedy nechal na podložce vyhřát tak, že nejstudenější body měly teplotu 70 °C a plast jsem za pomoci tepla upravil do požadovaného tvaru a hloubky zapuštění.

Bohužel se objevila chyba, kdy při výrobě hřídele byl vyřezán závit pro KM matici na místo, kde dosedá ložisko. Aby sedělo ložisko více pevně, byl závit zalepen epoxydovou pryskyřicí a následně byla plocha obroušena do průměru, aby ložisko neprokluzovalo, ale aby bylo možné jej sejmout. Poté nastalo vlastní osazení hřídele, kdy byl nasazen podkladný O kroužek a zasunuto pero sloužící k přenosu energie na hřídel a současně zabraňující prokluzu jednotlivých částí. Nakonec byly na hřídel nasazeny disky s mezikroužky, které bylo třeba lehce zabrousit, aby byl povrch hladší a rovnější. Bohužel pravděpodobně z důvodu součtu nepřesností mezikroužků a tloušťky plexiskla bylo možné nasadit pouze čtrnáct disků a mezikroužků z 16 plánovaných. Vše bylo následně na hřídeli staženo pomocí KM matice. Osazená hřídel vsazená do těla turbíny je na obrázku 9.1.



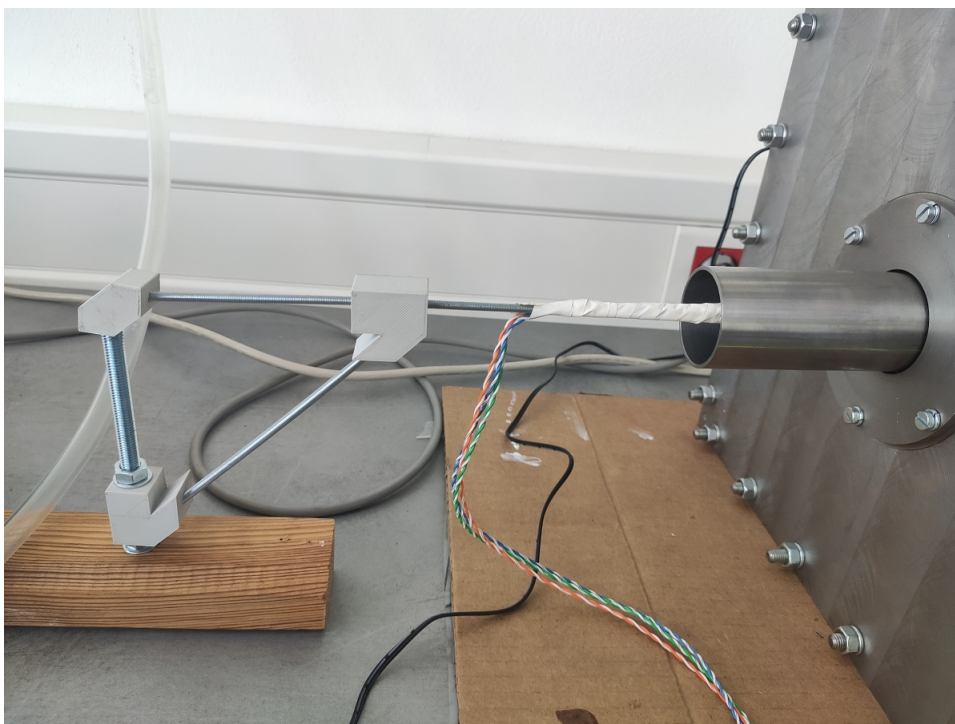
Obr. 9.1: Pohled do vnitřku sestavené turbíny

Pro další pokračování bylo nutné připravit ložiska na kompletaci. Bylo nutné je očistit od ochranného oleje, ve kterém jsou prodávány, k tomu byla využita ultrazvuková čistička. Očištěná ložiska byla promazána litnou vazelínou. V dalším kroku bylo nasunuto první ložisko na hřídel ze strany opěrného kroužku, kde je nasazeno na těsno a již není počítáno s jeho odstraněním. Takto osazená hřídel byla s ložiskem vsunuta do víka těla. Následně bylo vloženo ložisko do těla turbíny. Poté následoval nejobtížnější krok kompletace, kdy bylo potřeba zasunout hřídel vloženou do víka a současně usadit víko na středící kolíky. Při sesazování každé plochy kov na kov bylo potřeba kluzné plochy namazat. Na obrázku 9.2 je fotka turbíny bez nasazených krytů uložení. V posledním kroku došlo k namontování krytů uložení ložisek, které slouží současně k vymezení vůlí ložisek. V případě potřeby je možné kryty uložení opět sundat a provést mazání ložisek.



Obr. 9.2: Kompletně složená turbína

Další částí, kterou bylo třeba sestavit, je držák čidla pro měření teploty a tlaku vzduchu na výstupu, kdy je třeba senzor zasunout do rotující hřídele. Držák čidla je sestavený z dílů tištěných na 3D tiskárně, závitových tyčí a dřevěné podložky. Aby závitové tyče dobře sedly do tištěných dílů, tak byly horkým vzduchem nahřáty a poté zataveny do vytištěného dílu. Zasunutý držák je na obrázku 9.3.



Obr. 9.3: Držák čidla na výstupu

Při tlakovém testu se ukázalo, že domeček pro čidlo vstupu netěsní ani mezi vrstvami tištěného plastu a tak byl celý zatřený epoxidovou pryskyřicí, protože přes něj utíkalo velké množství vzduchu.

10 Naměřené parametry

Pro vyhodnocení reálné účinnosti turbíny je třeba znát vstupní a výstupní tlak a teplotu, průtok pohonného média a výkon, který přenáší na hřídeli. Pro zpřesnění výsledků je dobré dále určit ztráty probíhající uvnitř zařízení. Pro určení výkonu zařízení je možné použít dvě varianty. První variantou je, že na hřídel připojíme elektrický generátor o výkonu, který je vyšší než výkon měřeného zařízení a z výstupního napětí a proudu vypočteme výkon. Do této metody se ovšem přenáší nepřesnosti v přenosové soustavě a taktéž z důvodu nižší účinnosti motoru.

Druhá varianta se provádí za pomoci měřicí brzdy, kdy pomocí tohoto zařízení přesně určíme výkon.

Pro obecné určení výkonu se zanedbáním ztrát na discích, netěsnostech, ložiscích a hřídeli je možné vypočítat účinnost z poměru výstupní a vstupní entalpie plynu sloužícího pro pohon zařízení. Jedná se ovšem pouze o účinnost termickou, která značí, jak moc zařízení využívá energii plynu [56].

10.1 Entalpie H [J]

Jedná se o tepelnou energii uloženou v pracovním plynu a řídí se prvním zákonem termodynamiky. Při výpočtech pro vzduch se obecně vychází z chování suchého vzduchu (neobsahuje molekuly kapaliny).

Obecně lze entalpii vypočítat:

$$H = U + pV \quad (10.1)$$

kde U [J] je vnitřní energie plynu, p [Pa] je tlak plynu a V [m³] je jeho objem. Tento vzorec je poté možné upravit za pomoci stavové rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT \quad (10.2)$$

kde p [Pa] je tlak plynu, V [m³] objem, n [mol] je látkové množství, R [J.mol⁻¹.K⁻¹] je molární plynová konstanta a T [K] je termodynamická teplota.

Po úpravě tohoto těchto rovnic získáme tento tvar:

$$H = CpT \quad (10.3)$$

v této rovnici představuje Cp [J.kg⁻¹.K⁻¹] měrnou tepelnou kapacitu vzduchu a T [K] jeho teplota.

Pro výpočet účinnosti je poté vzorec:

$$\eta = \frac{H_2}{H_1} = \frac{C_p T_2}{C_p T_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (10.4)$$

měrná tepelná kapacita vzduchu se se změnou teploty prakticky nemění, a proto je považována za konstantu.

10.2 První test turbíny

Po sestavení turbíny přišel na řadu první test jejího roztočení pomocí školního rozvodu vzduchu. Zde jsme objevili problém, školní rozvod nemá při použitém průměru dostatečný tlak, maximum je 10 bar, pro rozpohybování turbíny. Z toho vyplývá, že i sestavený okruh pro měření nepoužitelný, protože je dělaný na nižší tlak.

Další variantou tedy bylo připojit turbínu přes ventil na láhev N₂, kdy je možnost dostat se tlakem přes 12 barů. Nebylo třeba využít ani maximálního tlaku a turbína se roztočila. Tím se povedlo ověřit, že konstrukce turbíny funguje. Video z tohoto pokusu naleznete v příloze E.

Následně bylo třeba připravit turbínu na samotné měření. Místa okolo vstupu, která netěsnila byla zatěsněna silikonem a byl připojen měřicí obvod. V rámci práce jsme se rozhodli ověřit termickou účinnost, protože jsme neměli možnost změřit výkon na hřídeli.

10.3 Naměření parametrů

Měření vstupních a výstupních teplot plynu turbíny probíhalo za teploty 22,6 °C a atmosférickém tlaku 1024 hPa. Provedlo se 5 po sobě jdoucích měření, kdy byl vytvořen aritmetický průměr a z něj byl vypočítána účinnost. Měření probíhalo za pomocí plynu N₂ při tlaku 11,5 barů na hadici o průměru 10 mm. Při použití dusíku je pro výsledek měření nejprve potřeba nechat ustálit teplot, kdy dochází k ochlazení celé turbíny plynem, který expanduje z tlakové lahve, jinak by byl výsledek ovlivněný teplem vyzařeným turbínou.

Tab. 10.1: Měření turbíny

Měření [-]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]
1	-16,7	-3,8
2	-17,3	-4,1
3	-17,5	-4,3
4	-17,2	-4,0
5	-17,8	-4,2
Průměr	-17,3	-4,08

$$\eta = \frac{C_p T_2}{C_p T_1} * 100 = \frac{T_2}{T_1} * 100 = \frac{-4,08}{-17,3} * 100 = 23,6 \% \quad (10.5)$$

Při měření bylo dosaženo maximálně 9500 ot/min a celková vypočtená termická účinnost zařízení je 23,6 %. Turbína měla ještě tendenci zrychlovat, avšak bylo dosaženo maxima otáček, na které jsou stavěna ložiska.

11 Závěr

V teoretické části práce jsou popsány jednotlivé druhy vodních zařízení. Byl zde rozebrán princip fungování vodních kol a jejich představitelé. Dále jsou v práci popsány vodní turbíny, a to jejich rozdělení a představitelé. V malé míře jsou v práci probrány turbíny parní, protože navrhovaná Teslova turbína je poháněna vzduchem. Dále se práce zabývá popisáním Teslovy turbíny. Popisuje se zde konstrukce, která je popsána v patentu, dále fyzikální jevy, které ovlivňují nejvíce fungování této turbíny. V práci se také Teslova turbína porovnává s dnes běžně využívanými typy turbín a je zde vypsána možnost jejího využití v praxi. Dále je zde popsán návrh Teslovy turbíny, který byl testován v bakalářské práci, kapitola je doplněna kompletací daného 3D modelu. Poslední kapitola popisuje úpravy konstrukce, které vyhovují strojnímu obrábění.

V praktické části je popsáno, jak probíhalo sestavování turbíny a jaké problémy byly třeba vyřešit. U konstrukce se jednalo především o závit udělaný na špatném místě a také ne úplně padnoucí část vnitřku turbíny. Nejlepší technologie pro výrobu turbíny by byla technologie SLS a využití topologické optimalizace, u které by se ušetřilo větší množství materiálu a taky by to umožnilo složitý tvar v těle vyrobit z jednoho kusu. Při prvním pokusu o rozpohybování turbíny ze školního rozvodu vzduchu bylo zjištěno, že při průměru hadice 10 mm je tlak 10 barů nedostatečný k uvedení turbíny do pohybu, proto byla termická účinnost měřena plynem N₂ z tlakové lahve, aby bylo dosaženo vyššího tlaku. Z toho vyplývá, že by bylo třeba využít většího průměru pohonné soustavy pro rozvod média, případně vyššího tlaku vzduchu. Dále je v práci popsáno z jakých dílů je sestaven obvod pro měření parametrů turbíny, avšak tento obvod nevyhovuje požadavkům na měření takového zařízení z důvodů výše popsaných. V poslední kapitole je zmíněno, jak probíhá vyhodnocování parametrů sestavené turbíny, z důvodu státní karantény a vzniklého zdržení nezbyl čas na změření turbíny na brzdě pro ověření reálných parametrů. Turbínu se ovšem povedlo roztočit na 9500 ot/min a dosahuje termické účinnosti 23,6 %.

Zařízení bylo konstruováno s cílem možného budoucího využití v bakalářském předmětu Obnovitelné zdroje energie. Turbínu se povedlo rozpohybovat, ale stále je pro toto využití třeba dořešit několik věcí. Bylo by vhodné, aby v rámci nějaké následující bakalářské/diplomové práce student vytvořil měřicí soustavu využívající snímače vhodné například k použití v průmyslu. Dále bude třeba dodělat zátěž pro turbínu. Jako možnou variantu lze využít například automobilový alternátor připojený přes ozubená kola, který by se také poté dal využívat i k předtáčení turbíny, jako tomu bývá u reálných elektráren.

Literatura

- [1] KLEZKA, Vojtěch. *Vodní kola*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.
- [2] Gifhorn - vod1. In: *Povětrník* [online]. Brno: Povětrník, 2006 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://povetrnik-cz.svethostingu-tmp.cz/rs/image/200605152239_100_9969.jpg
- [3] NEŠPOROVÁ, Kristina. *Mlýn*. In: *Dřevostavitel* [online]. Dřevostavitel, 2017 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z:<https://www.drevostavitel.cz/galerie/clanky/656/mlyn.jpg>
- [4] Kolarovo. In: *Fotografie míst Slovenska* [online]. Fotografie míst Slovenska, [cit. 2017-11-26]. Dostupné z:<http://www.kamim.sk/fotkym/kolarovo-10.jpg>
- [5] Zuppingerovo kolo. In: *Vodní kola* [online]. Vodní kola, [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: http://www.vodnikola.cz/img/zuppingerovo_kolo.jpg
- [6] Korečnick na horní vodu. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-11-26]. Dostupné z:<http://mve.energetika.cz/vodnikolaHD/korecnikHD.htm>
- [7] Turbine. In: *Dictionary.com* [online]. Dictionary.com [cit. 2017-10-26]. Dostupné z:<http://www.dictionary.com/browse/turbine>
- [8] MACHÁT, Pavel. *VODNÍ TURBÍNY A JEJICH VYUŽITÍ*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Ing. Daniel Himr.
- [9] ROVNOTLAKÁ VODNÍ TURBÍNA. *ČEZ* [online]. xx: ČEZ, 1999 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/rovnotlak_vodturb.html
- [10] Peltonova turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/pelton.htm>
- [11] Peltonova Turbína. In: *Jihlavsko* [online]. Jihlavsko, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z:<http://vyuka.jihlavsko.cz/elektrina-vyroba/obr/turbina-peltonova-tech-muzeum-Brno2008.jpg>

- [12] Turbína Turgo. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/turgo.htm>
- [13] Congratulations! You have a tiny turbine. In: *National Trust Going Green* [online]. National Trust Going Green, 2013 [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: <https://ntenvironmentalwork.files.wordpress.com/2013/05/hydrolite-gorsen.jpg>
- [14] Bánkiho turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [15] Hydr'open: an ingenious small turbine to give access to energy. In: *LinkedIn* [online]. Grenoble, France: We share the power, 2015 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: https://media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp_400_400/AAEAAQAAAAAAAAInAAAAJDMwZTl1MjBhLTAzOTMtNGE2Yy05NWQzLWYyMzI3YzRmZjA2Mw.jpg
- [16] PŘETLAKOVÁ VODNÍ TURBÍNA. ČEZ [online]. ČEZ, 1999 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/pretlak_vodturb.html
- [17] Francisova horizontální turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-horiz.htm>
- [18] Francisova vertikální turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-vertik.htm>
- [19] Horizontální turbína se "suchou savkou". In: *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů, [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-horiz.htm>
- [20] Francisova vertikální turbína. In: *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc, Abecedamalýchvodníchpohonů [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-verikalni.gif>
- [21] Kaplanova S-turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. Olomouc: Abeceda malých vodních pohonů [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/kaplan-s.htm>

- [22] Deriaz turbine. *The Worlds of David Darling* [online]. The Worlds of David Darling [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/AE_Deriaz_turbine.html
- [23] Deriaz turbine. In: *Strukts* [online]. 2012 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: http://1.bp.blogspot.com/-pcl0Ya-DxdU/VRQi5NvMAMI/AAAAAAAAABSw/Ql9IUckgn2Y/s320/Deriaz_turbine.jpg
- [24] BLOUDÍČEK, Petr. *KONSTRUKCE TESLOVY TURBÍNY*. Brno, 2007. Diplomová práce. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV KONSTRUKOVÁNÍ. Vedoucí práce Ing. David Paloušek.
- [25] Nachbau einer Tesla-Turbine mit 3D-gedruckten Bauteilen – Teil 1. In: *Mark3D* [online]. Mark3D [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://www.mark3d.com/wp-content/uploads/2017/04/tesla-animation.gif>
- [26] PODERGAJS, Matej. *The Tesla Turbine*. Lublaň, 2011. Seminární práce. University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics. Vedoucí práce Prof. dr. Rudolf Podgornik.
- [27] Build a 15,000 Rpm Tesla Turbine Using Hard Drive Platters. In: *Instructables* [online]. Instructables [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://cdn.instructables.com/FV0/S7YD/5AQEP27YAST/FV0S7YD5AQEP27YAST.MEDIUM.jpg>
- [28] MRAČNA STRANA GENIJA: Nikola Tesla zagovarao je nešto stravično u ljudskom rodu!. In: *Slobodna Bosna* [online]. Slobodna Bosna, 2017 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: http://www.slobodna-bosna.ba/img/vijesti/2017/02/nikola_tesla.jpg
- [29] NIKOLA TESLA THE GENIUS WHO LIT THE WORLD. *Tesla Memorial Society of New York* [online]. New Yourk: Tesla Memorial Society of New York, 1998 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.teslasociety.com/biography.htm>
- [30] Nikola. *Turbine*. 1911. USA. US1061206 A. Uděleno 6. květen 1913. Zapsáno 17. leden 1911.
- [31] 10 Greatest Inventions of Nikola Tesla. In: *Pinterest* [online]. TopTenz.net, 2015 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://i.pinimg.com/736x/a9/59/13/a95913cb7d977fe34d7ccefc7128d7fa--tesla-turbine-tesla-inventions.jpg>

- [32] Tesla pump patent. In: *Tesla universe* [online]. UNITED STATES PATENT OFFICE [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://teslauniverse.com/nikola-tesla/patents/us-patent-1061142-fluid-propulsion>
- [33] LOKAJ, Jakub. *TESLOVA BEZLOPATKOVÁ TURBINA*. Brno, 2016. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.
- [34] TESLA TURBINE. In: *Joshua Koerpel* [online]. Joshua Koerpel [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://joshuakoerpel.com/wp-content/uploads/2012/01/medium.jpg>
- [35] MAŠTOVSKÝ, Otakar. *Hydromechanika pro strojní inženýry*. SNTL, 1956.
- [36] JANALÍK, Jaroslav. *VYBRANÉ KAPITOLY Z MECHANIKY TEKUTIN*. Ostrava, 2008. Výukový text. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [37] ROZDÍLY V PROUDĚNÍ. In: *Techmania science center* [online]. Techmania science center [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/sites/default/files/podrobnosti/insert/182-1.gif>
- [38] Anticyklóna – tlaková výše. In: *El speedo* [online]. El speedo [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: https://elspeedo.cz/wp-content/uploads/2016/12/turbulentni_proudeni.jpg
- [39] *3D tisk a jeho využití v technickém vzdělávání*. České Budějovice, 2015. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Petr Pexa, Ph.D.
- [40] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3. In: *Prusa Research* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3.html>
- [41] KLÍMA, Petr. *Parní turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [42] ENERGIE V ZEMI ZROZENÁ. In: *Visions* [online]. Česká republika: Siemens Visions, 2016, 02.02.2013 [cit. 2019-09-11]. Dostupné z: <https://www.visionsmag.cz/energie-v-zemi-zrozena>
- [43] Fused Deposition Modeling. In: *3D -tisk.cz* [online]. Nová média, 2013 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>

- [44] Ukázka DLP (SLA) tisku. In: *Blueberry 3D print* [online]. Jablonec nad Nisou: Blueberry 3D print, 2018 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.blueberry3dprint.cz/single-post/2018/03/18/Uk%C3%A1zka-DLP-SLA-tisku>
- [45] Stereolithography SLA 3D Printing Service. In: *Indiamart* [online]. 2015 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/stereolithography-sla-3d-printing-service-16058778573.html>
- [46] Selective Laser Sintering. In: *3d-tisk.cz* [online]. Nová média, 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [47] Graphite Additive Manufacturing on slashing lead times in SLS 3D printing. In: *3D Printing Industry* [online]. 2018 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://bit.do/fg7wE>
- [48] *Arduino Uno* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>
- [49] Images (278x182) [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcT3giwy-0-hCVDhootIZV9xhIRRXt9D1pGWoknFrXXTKDOM-ap2&usqp=CAU>
- [50] LCD KeyPad Shield For Arduino SKU: DFR0009. In: *DFROBOT* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://wiki.dfrobot.com/Arduino_LCD_KeyPad_Shield__SKU__DFR0009_
- [51] 1336.jpg. In: *Arduino shop* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/photos/produkty/d/1/1336.jpg?m=1550310280>
- [52] *GY-BMP280-3.3* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/GY-BMP280-3.3%20Module%20Datasheet.pdf
- [53] Bmp_280_over-500x500.jpeg. In: *PÁJENÍČKO.CZ* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://pajenicko.cz/image/cache/catalog/komponenty/senzory/bmp280/bmp280_over-500x500.jpeg
- [54] *FS 1012 Datasheet* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.idt.com/eu/en/document/dst/fs1012-datasheet>

- [55] FS1012-1001-LQ-IDT-FNT-MED.JPG. In: *Future Electronics* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://media.futureelectronics.com/SEMICONDUCTORS/ANALOG/SENSORS/FLOW/FS1012-1001-LQ-IDT-FNT-MED.JPG?m=k6P9NE>
- [56] *Technická termodynamika*. 2. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1963.

Seznam příloh

A Výrobní soubory	67
B 3D model	68
C Video turbíny z bakalářské práce	69
D Video a fotky turbíny z diplomové práce	70
E Software	71
F Obsah přiloženého CD	72

A Výrobní soubory

Příloha A obsahuje použitou výrobní dokumentaci a soubory použité pro 3D tiskárnu.

B 3D model

Příloha B obsahuje kompletní soubory z programu SolidWorks

C Video turbíny z bakalářské práce

Příloha C obsahuje video sloužící k ukázce vnitřního pohybu turbíny

D Video a fotky turbíny z diplomové práce

Příloha D obsahuje video a fotky finálně zhotovené turbíny v pohybu.

E Software

Příloha E obsahuje program měřicího okruhu arduina.

F Obsah přiloženého CD

/	kořenový adresář přiloženého CD
└ Přílohy	
└ Příloha A	Výrobní soubory
└ Příloha B	3D model
└ Příloha C	Video turbíny z bakalářské práce
└ Příloha D	Video a fotky turbíny z diplomové práce
└ Příloha E	Arduino software
└ Použité obrázky	
└ Sedina_DP_Teslova_turbina.pdf	hlavní soubor práce
└ readme.txt	soubor s popisem obsahu CD