



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F2

**Fakulta strojní
Ústav energetiky**

Bakalářská práce

Návrh vodní mikro turbíny vyráběné 3D tiskem

**Rešerše stavu oboru vodních mikro turbín a návrh zkušební
turbíny**

Vilém Hron

Teoretický základ strojního inženýrství

Květen 2021

Vedoucí práce: Ing. Václav Novotný

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval své rodině za materiální a duševní podporu během studia a při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům Ústavu energetiky Českého vysokého učení technického v Praze za materiální a finanční zázemí pro tvorbu práce. Jmenovitě pak vedoucímu práce inženýru Václavu Novotnému za ochotnou a hodnotnou spolupráci.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 4. 6. 2021

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce stručně prezentuje důležité informace z oboru hydroenergetiky a vodních turbín - informace stěžejní pro návrh vlastní vodní turbíny.

Rešeršní část uvádí shrnutí současných metod 3D tisku a jejich vlastností. Dále obsahuje výběr zajímavých experimentů s laboratorními mikro turbínami a výsledky jejich měření. Rešerše by měla poskytnout přehled současného stavu ve výzkumu 3D tištěných vodních turbín a naznačit správné směřování pokusů v laboratoři.

Výpočetní část odvozuje všechny vztahy potřebné pro konstrukci turbíny. Výpočty vychází ze základních principů mechaniky tekutin.

Návrh turbíny spočívá v aplikaci odvozených vztahů na zadání a stanovení určujících rozměrů turbíny. Část realizace sleduje konstrukční návrh turbíny podle vypočítaných rozměrů.

Kapitola měřicí trati předkládá návrh na provedení měřicí trati tak, aby umožnila nastolení požadovaných podmínek a měření všech veličin.

Klíčová slova: hydroenergetika; vodní mikro turbína; 3D tisk; MJF.

In this paper you are presented with basic information from hydro power engineering and water turbine design.

Research has been made in modern 3D printing technologies and state-of-the-art micro turbine designs, which use 3D printing as means of fabrication. Findings from experimental runs on micro turbines are cited as to provide overview of possible outcomes (power, efficiency etc.).

Next, principles of fluid mechanics are used to create a viable mathematical model for the microturbine. If correct, the mathematical description should provide values quintessential for the turbine design, based on a given input.

Actual manufacturing of the turbine takes place in the next chapter.

A test bed for the micro turbine is drafted to be capable of delivering sufficient flow at a given head. The test bed should also be capable of measuring important values in the circuit.

Keywords: hydropower; micro hydro turbine; 3D printing; MJF.

Title translation: Design of micro hydro turbine manufactured by 3D printing (Research in the field of pico hydro power and the design of a model turbine)

Obsah /

1 Zkratky	2	6.2.2 Výpočet rychlosti c_1	28
2 Symboly	2	6.2.3 Určení maximální účinnosti	30
3 Indexy	3	6.3 Účinnost Bánkiho turbíny	32
1 Úvod	4	6.4 Odvození geometrie trysky	34
2 Hydroenergetika	5	6.5 Mimooptimální provoz turbíny	35
2.1 Dělení vodních elektráren	5	6.6 Vliv tření vazké tekutiny	37
2.2 Hlavní parametry vodního díla ..	5	7 Návrh zkušební turbíny	39
2.2.1 Průtok Q	5	7.1 Parametry turbíny	39
2.2.2 Spád H	6	7.2 Geometrie turbíny	39
2.3 Princip činnosti vodní turbíny ..	7	7.3 Charakteristika turbíny	40
2.4 Výkon turbíny	7	7.4 Realizace turbíny	41
3 Vodní turbíny	10	8 Návrh měřicí trati	46
3.1 Ztráty v turbíně	10	8.1 Měření na trati	46
3.1.1 Objemové ztráty	10	9 Závěr	49
3.1.2 Hydraulické ztráty	10	9.1 Shrnutí práce	49
3.1.3 Mechanické ztráty	10	9.2 Návrh	49
3.2 Ztráty v turbíně malého měřítka	10	9.3 Výroba	49
3.3 Základní typy vodních turbín .	12	Literatura	51
3.3.1 Peltonova turbína	12	9.1 Seznam elektronických příloh .	52
3.3.2 Turbína Turgo	12		
3.3.3 Bánkiho turbína	13		
3.3.4 Francisova turbína	14		
3.3.5 Kaplanova turbína	14		
4 3D tisk	16		
4.1 Metody 3D tisku	16		
4.1.1 FDM	16		
4.1.2 PBF	17		
4.1.3 Inkjet	18		
4.1.4 SLA	18		
4.1.5 DED	19		
4.2 Materiály pro 3D tisk	20		
5 Stav výzkumu vodních turbín vyráběných 3D tiskem	21		
5.1 Specifické vlastnosti mikro turbín	21		
5.2 Prototypová výroba, experimentální provoz	22		
5.3 Turbíny na výrobu elektřiny ..	23		
6 Hydraulické řešení Bánkiho turbíny	26		
6.1 Předpoklady a vstupní parametry	26		
6.2 Návrh Bánkiho turbíny	26		
6.2.1 Určení provozních podmínek turbíny	27		

Tabulky / Obrázky

2.1. Dělení VE	5	2.1. Překročení průměrných denních průtoků	6
2.2. Dělení MVE	5	2.2. Vyznačení spádu	6
2.3. Důležité hodnoty průtoků	5	2.3. Složky absolutní rychlosti	8
3.1. Naměřené účinnosti různých druhů turbín	12	2.4. Rychlostní trojúhelníky	8
3.2. Tabulka vlastností Peltonovy turbíny	12	3.1. Graf účinnosti podle velikosti turbíny	11
3.3. Tabulka vlastností turbíny Turgo	13	3.2. Graf naměřené účinnosti Peltonovy turbíny	11
3.4. Tabulka vlastností Bánkiho turbíny	13	3.3. Obrázek Peltonovy turbíny	12
3.5. Tabulka vlastností Franciscovy turbíny	14	3.4. Obrázek turbíny Turgo	13
3.6. Tabulka vlastností Kaplanovy turbíny	14	3.5. Obrázek Bánkiho turbíny	13
4.1. Tabulka vlastností FDM tisku .	16	3.6. Obrázek Franciscovy turbíny ...	14
4.2. Tabulka vlastností PBF tisku .	17	3.7. Obrázek Kaplanovy turbíny ...	15
4.3. Tabulka vlastností inkjet tisku	18	4.1. Porovnání ceny 3D tisku a ostatních technologií	16
4.4. Tabulka vlastností SLA tisku..	18	4.2. Schéma FDM tiskárny	17
4.5. Tabulka vlastností DED tisku .	19	4.3. Schéma PBF tiskárny	17
6.1. Vstupní parametry	26	4.4. Schéma inkjet tiskárny	18
6.2. Parametry návrhu	27	4.5. Schéma SLA tiskárny	19
7.1. Zadané vstupní parametry	39	4.6. Schéma DED tiskárny	19
7.2. Přidružené parametry turbíny .	39	4.7. Tahový diagram plastů	20
7.3. Geometrie turbíny	40	5.1. Vírová turbína	21
8.1. Měření na trati	47	5.2. Malá turbína s jednoduchou spirálou	22
		5.3. Účinnost modifikované laboratorní turbíny	22
		5.4. Zkoušky různých sestav laboratorní turbíny	23
		5.5. Výsledky numerického výpočtu a naměřené hodnoty	23
		5.6. Pozorování kavitace a stability turbíny	24
		5.7. Peltonova turbína vyrobená na inkjet tiskárně	24
		5.8. Palcová turbínka inkjet technologií	24
		5.9. Archimedův šnek vyrobený na FDM tiskárně	25
		6.1. Geometrie Bánkiho turbíny	26
		6.2. Dráha vody v kole Bánkiho turbíny	27
		6.3. Náčrt zrychlení vody mezi lopatkami	29
		6.4. Zavedení součinitele ξ	30
		6.5. Změna rychlosti vody v kole ...	31

6.6.	Rychlostní trojúhelníky 1 a 4 ..	31
6.7.	Rychlostní trojúhelníky 1 a 4 s pravým úhlem	32
6.8.	Graf optimálních otáček	33
6.9.	Graf účinnosti turbíny	34
6.10.	Náčrt trysky	34
6.11.	Ráz při mimooptimálním provozu	35
6.12.	Vstupní a výstupní rychlostní trojúhelník při mimooptimál- ním provozu	36
6.13.	Náhradní kanál pro výpočet tření.....	37
7.1.	První rychlostní trojúhelník ...	40
7.2.	Graf účinnosti navržené tur- bíny	40
7.3.	Graf účinnosti navržené tur- bíny	41
7.4.	Graf účinnosti turbíny při nominálním průtoku	42
7.5.	Obrázek materiálů použitých na výrobu turbíny.....	42
7.6.	Prototypy víček	43
7.7.	Prototyp výlevky.....	43
7.9.	Svařená skříň	43
7.8.	Vyrobená hřídel	44
7.10.	Obrázky z výroby	45
8.1.	Schéma měřicí trati	46
8.2.	Návrh spodní nádrže	47
8.3.	Cipolletiho měrný přeliv	47
8.4.	3D model brzdy	48



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hron** Jméno: **Vilém** Osobní číslo: **482606**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh vodní mikroturbíny vyráběné 3D tiskem

Název bakalářské práce anglicky:

Design of micro hydro turbine manufactured by 3D printing

Pokyny pro vypracování:

3D tisk přináší řadu možností pro výrobu komplexních tvarů a snížení množství komponent a výrobní ceny komplexních celků. Jedním z oborů energetiky, kam také začíná pronikat, jsou hydraulické stroje a pohony. Řada hráčů na trhu vodních turbín a čerpadel zkoumá možnosti 3D tisku pro velké aplikace. Nicméně v mikro-aplikacích vodních turbín, které dosud byly ekonomicky zcela nerentabilní, může 3D tisk přinést ještě zajímavější možnosti. Součástí této práce bude:

- Úvod do malých vodních turbín se zaměřením na mikro-aplikace
- Rešerše aktuálního stavu výzkumu a vývoje v oblasti 3D tištěných vodních turbín ve světě
- Výpočtový návrh mikro-turbíny zvoleného typu
- Konstrukční návrh mikro-turbíny zvoleného typu a experimentální trati pro její ověření
- Závěrečná shrnutí a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Václav Novotný, ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

Ing. Václav Novotný
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

1 Zkratky

MVE	Malá vodní elektrárna
VE	Vodní elektrárna
FDM	Fused deposition modelling
PBF	Powder bed fusion
SLA	Stereolithography
DED	Direct energy deposition
CFD	Computational fluid dynamics
PLA	Polylactid acid
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PVC	Polyvinylchlorid
MJF	Multi jet fusion

2 Symboly

Q	[m ³ /s]	Průtok
H	[m]	Spád vodního díla
H_b	[m]	Hrubý spád vodního díla
H_m	[m]	Virtuální spád
F	[N]	Síla
m	[kg]	Hmotnost
t	[s]	Čas
ρ	[kg/m ³]	Hustota (vody)
r	[m]	Rameno, polohový vektor
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost
P	[W]	Výkon
P_h	[W]	Hydroenergetický potenciál
v	[m/s]	Charakteristická rychlost proudění v kanálu
c	[m/s]	Absolutní rychlost
u	[m/s]	Unášivá rychlost
w	[m/s]	Relativní rychlost
c_u	[m/s]	Obvodová složka absolutní rychlosti
c_m	[m/s]	Meridiální složka absolutní rychlosti
c_a	[m/s]	Axiální složka absolutní rychlosti
e_z	[J/s]	Měrná ztrátová energie
λ	[1]	Součinitel třecích ztrát
l	[m]	Délka kanálu
d_h	[m]	Hydraulický průměr
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
k_r	[1]	Relativní drsnost kanálu
k	[m]	Absolutní drsnost kanálu
x	[m]	Souřadnice 3D tiskárny
y	[m]	Souřadnice 3D tiskárny
z	[m]	Souřadnice 3D tiskárny
T	[K]	Teplota
T_T	[K]	Teplota tání základního materiálu
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení

D	[m]	Velký průměr oběžného kola
d	[m]	Malý průměr oběžného kola
D_t	[m]	Průměr vstupu trysky
α	[°]	Úhel absolutní rychlosti
β	[°]	Úhel relativní rychlosti
γ	[°]	Doplňkový úhel
β_{in}	[°]	Vstupní úhel lopatky
β_{out}	[°]	Výstupní úhel lopatky
K	[1]	Parametr tvaru kola
f	[Hz]	Frekvence otáčení turbíny
p	[Pa]	Tlak
A	[m ²]	Plocha
δ	[rad]	Úhel výseče
b	[m]	Šířka kola/ šířka přelivu
h	[m]	Výška trysky/ výška hladiny v přelivu
a	[m/s ²]	Zrychlení
ξ	[1]	Korekční součinitel
η	[1]	Účinnost
ϕ	[rad]	Úhel napájení
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita vody
o	[m]	Smočený obvod
ϵ	[m]	Poloměr lopatky

3 Indexy

55%	Střední
95%	Maximální
355d	Překročen 355 dní v roce
1	Vstupní/ v místě 1
2	Výstupní/ v místě 2
3	V místě 3
4	V místě 4
A	Úseku A
B	Úseku B
C	Úseku C
D	Úseku D
t	Teoretická
m	Mimooptimální
o	Opravená
opt	Optimální

Kapitola 1

Úvod

S rostoucí lidskou populací na zemi se zvyšují nároky na dostupnost elektrické energie. Nároky na efektivitu získávání elektřiny rostou stejně jako poptávka po nových zdrojích. Hydroenergetika určitě není novým zdrojem, naopak řadí se mezi ty nejstarší. To ale neznamená, že neprochází vývojem. S využitím nových technologií lze i stávající elektrárny modernizovat a zlepšit jejich výkony. Příkladem může být přestavba elektrárny Lipno I, která zvýšila elektrickou účinnost o 4% a snížila spotřebu hydraulického oleje v řídicích systémech [1]. Tento příklad výstižně dokumentuje důraz na **vysokou účinnost** a **ekologičnost** využívání zdrojů.

Vodní elektrárny splňují obě tato kritéria a jsou dlouhodobě udržitelné. Problém je v nedostatku velkých toků, které by poskytovaly potenciál pro výrobu elektrické energie v rádech MW [2]. Naproti tomu nevyužitých menších toků, se zastaralými nebo zrušenými malými vodními elektrárnami (MVE) [3], existuje řada. Budoucnost rozšiřování vodní energetiky tedy leží především v malých a mikro zdrojích.

Moderní technologie umožňují, mimo zvyšování výkonu stávajících zdrojů, vznik nových druhů energetických zařízení. Téma práce se věnuje 3D tisku.

3D tisk je aditivní technologie, která umožňuje operativně, s krátkou prodlevou mezi návrhem a výrobou, zhotovovat komplexní tvary z plastů a dalších materiálů. Cena malosériové výroby 3D tištěných dílů je značně nižší, než například cena vstřikovaných dílů [4]. 3D tisk je vhodný pro výrobu prototypů, náhradních dílů nebo funkčních součástí. Polotovary pro 3D tisk bývají zpravidla různé druhy plastů, které nevynikají vysokou pevností. Přesto je možné je využít pro výrobu málo namáhaných dílů.

Spotřeba elektřiny ve tříčlenné domácnosti je průměrně 500 W [5]. Pokrytí spotřeby z lokálního vodního zdroje by zajistila turbína s výkonem menším než 1 kW. Při takto malých výkonech je možné uvažovat o 3D tištěné turbíně i z plastových materiálů.

Ověření funkčnosti a limitů podobného řešení si dává za cíl tato práce. V úvodu bude čtenář seznámen se základy hydroenergetiky, navrhování vodních turbín a současnými metodami 3D tisku. Dále bude následovat hydraulický rozbor a návrh turbíny podle zadaných hodnot. Na konec bude vytvořen návrh konkrétní turbíny s výkonem desítek až stovek W a měřicí trati pro testování takových turbín.

Kapitola 2

Hydroenergetika

Kapitola *Hydroenergetika* má za cíl seznámení se s pojmy hydroenergetiky, hlavními parametry vodních strojů a způsoby navrhování turbín.

2.1 Dělení vodních elektráren

Vodní elektrárny jsou rozděleny na základě instalovaného výkonu podle normy ČSN 75 0120:

Tabulka 2.1. Rozdělení vodních elektráren podle normy ČSN 75 0120 [6].

Velké elektrárny	> 200 MW
Střední elektrárny	200 MW až 10 MW
Malé elektrárny	< 10 MW

Dále se MVE dělí na:

Tabulka 2.2. Rozdělení MVE podle normy ČSN 75 0120 [6].

Průmyslové elektrárny	10 MW až 1 MW
Minielektrárny	1 MW až 100 kW
Mikroelektrárny	100 kW až 35 kW
Domácí elektrárny	< 35 kW

2.2 Hlavní parametry vodního díla

Každý stroj musí být navržen tak, aby splňoval určité zadání - pracoval správně v určitých podmínkách. Správné stanovení vstupních parametrů je nutnou podmínkou pro úspěšný návrh turbíny. Postačující parametry, které se běžně pro návrh používají podle [7], jsou uvedeny níže:

2.2.1 Průtok Q

Průtok je charakteristikou vodního toku a jeho hodnotu je třeba brát v úvahu při návrhu výkonu a typu turbíny. Velikost průtoku se v čase mění, proto návrhu turbíny předchází dlouhodobé měření průtoku v dané lokalitě. Aby bylo možné data využít, je potřeba je uspořádat. Vhodným způsobem je sestavení grafu *překročení průměrných denních průtoků*, jako je na obrázku 2.1. Z grafu se odečítají důležité parametry toku:

Tabulka 2.3. Tabulka průtoků charakterizujících vodní tok.

$Q_{50\%}$...střední průtok	Slouží pro výpočet roční vyrobené energie.
$Q_{95\%}$...minimální průtok	Slouží na dimenzování elektrárny.
Q_{355d} ...průtok 355 dní v roce	Slouží ke stanovení minimálního sanačního průtoku.

Kapitola 3

Vodní turbíny

Tato kapitola se věnuje fungování vodních turbín, ověřeným konstrukcím a základům hydraulického návrhu vodních turbín.

3.1 Ztráty v turbíně

Provoz vodní elektrárny, ani vodní turbíny se neobejde beze ztrát. V následujících odstavcích budou uvedeny největší zdroje ztrát a jejich vliv na turbíny malého měřítka.

3.1.1 Objemové ztráty

Objemovými ztrátami se rozumí průtok vody mimo lopatky turbíny. Voda může unikat konstrukční vůlí mezi kolem a skříní, netěsnostmi nebo může být odváděna pro chladicí účely. Objem vody, který neprojde oběžným kolem, nekoná práci a přispívá ke ztrátám.

3.1.2 Hydraulické ztráty

Hydraulické ztráty jsou způsobeny disipací kinetické energie vazké tekutiny. Ztráty jsou způsobeny třením na povrchu turbíny a místními ztrátami. Hydraulické ztráty se zvyšují při *mimooptimálním* provozu turbíny, to znamená že turbína nepracuje v návrhových podmínkách a její geometrie neodpovídá vzniklému proudění. Na lopatkách v takových případech vznikají *hydraulické rázy*, které negativně ovlivňují účinnost.

3.1.3 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty plynou především ze tření strojních součástí turbíny. Spadají mezi ně ztráty v ložiskách, těsnících kroužcích apod.

3.2 Ztráty v turbíně malého měřítka

Při nominálním provozu turbíny se na hydraulických ztrátách podílí téměř výhradně ztráty třecí. Výpočet velikosti třecích ztrát a konkrétní účinnosti bude uveden v kapitolách *Hydraulické řešení Bánkiho turbíny* a *Návrh zkušební turbíny*. Ale zde bude naznačen princip, kvůli kterému malé turbíny dosahují malých účinností.

Hydraulické třecí ztráty e_z lze vyjádřit *Weissbachovým vztahem*[9]:

$$e_z = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

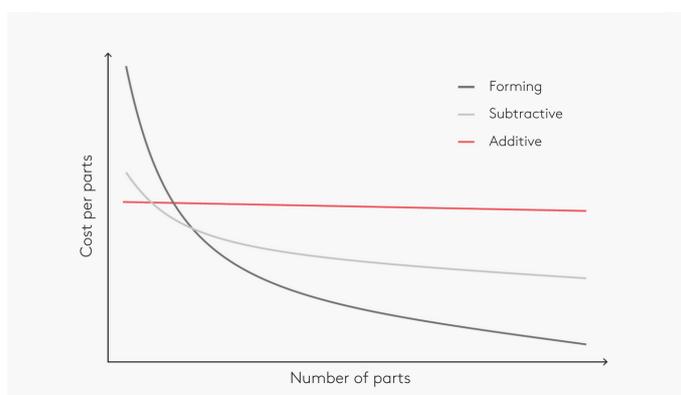
Kde λ je *součinitel třecích ztrát* a v je rychlost vody. Proměnné d_h, l jsou charakteristické rozměry protékaného kanálu. Více o ztrátách v kapitole *Vliv tření vazké tekutiny*.

Součinitel třecích ztrát je obecně funkcí $\lambda = \lambda(Re, k_r)$. Podle předběžných výpočtů v turbíně nastane turbulentní režim proudění, součinitel třecích ztrát je pak funkcí pouze $\lambda = \lambda(k_r)$. *Relativní drsnost kanálu* k_r se stanoví ze vzorce:

Kapitola 4

3D tisk

Jak bylo řečeno v úvodu, 3D tisk je moderní a perspektivní odvětví průmyslu. Jeho role je nejvýznamnější při tvorbě prototypů, modelů a malosériové výrobě. Představu o nákladech na různé technologie lze získat za grafu 4.1, který porovnává kusovou cenu různých technologií podle počtu vyráběných kusů.



Obrázek 4.1. Graf relativní ceny různých technologií (přejato z [4]).

4.1 Metody 3D tisku

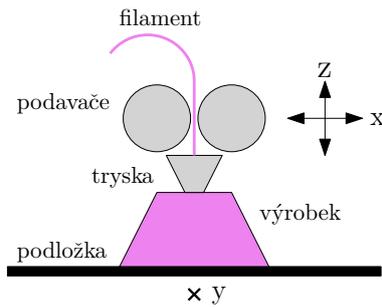
Většina dostupných metod 3D tisku pracuje ve 3 osách - x,y,z a to tak, že osa z určuje vrstvu tisku a osy x,y tvoří řez součásti. Tiskárna postupně vytváří řez o tloušťce Δz ve výšce z_n , po dokončení každého řezu se posune na výšku $z_{n+1} = z_n + \Delta z$. Tento cyklus se opakuje, dokud není dosažena maximální výška. Ačkoliv je princip podobný, každá metoda nanáší materiál jiným způsobem a podle toho se liší vlastnosti výrobků.

Rozdělení je zpracováno podle [14].

4.1.1 FDM

Tabulka 4.1. Charakteristiky FDM tisku.

Zkratka	Fused deposition modelling
Popis	Navarování
Polotovar	Drát - <i>filament</i>
Materiál	Termoplasty
Způsob nanášení	Tavení drátu v horké trysce



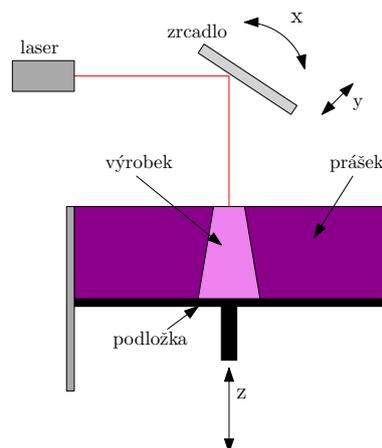
Obrázek 4.2. Nákres principu FDM tiskárny (upraveno z [14]).

Princip FDM tisku je velmi jednoduchý. Jak je vidět na obrázku 4.2, pohyb v rovině x, y zajišťuje součinnost posuvu trysky a podložky. Souřadnice z se po každé vrstvě navýší vystoupaním trysky. Natavený filament je postupně nanášen nejprve na podložku a potom na předchozí vrstvy. Vychladnutím filament tvrdne a drží požadovaný tvar. FDM je poměrně omezený, co se týče tisku převisů. Homogenita výrobků a jakost povrchu patří k těm horším. Hlavní výhodou je v dostupnosti, rychlosti a nízké ceně.

4.1.2 PBF

Tabulka 4.2. Charakteristiky PBF tisku.

Zkratka	Powder bed fusion
Popis	Spékání prášku vysokoenergetickým paprskem
Polotovar	Prášek
Materiál	Termoplasty nebo kovy
Způsob nanášení	Nanesení tenké vrstvy prášku na předchozí vrstvu



Obrázek 4.3. Nákres principu PBF tiskárny (upraveno z [14]).

Souřadnice z odpovídá hloubce zasunutí tiskové podložky do lože tiskárny 4.3. Vrstvy tisku jsou tvořeny rozprostřením práškového polotovaru a jeho spečením laserovým paprskem. Řezy jsou tvořeny pohybem paprsku v x, y . Tvary tištěné na PBF jsou prakticky neomezené s výjimkou uzavřených dutin a extrémních detailů. K nedostatkům patří nákladný provoz a menší tiskový objem.

Kapitola 5

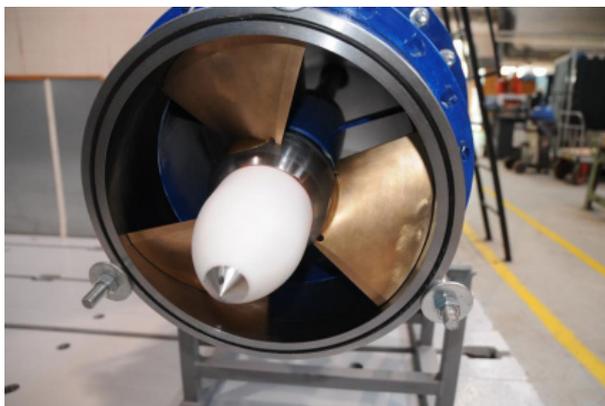
Stav výzkumu vodních turbín vyráběných 3D tiskem

Dostupnost 3D tisku inspirovala ne jeden výzkumný ústav k experimentování s vodními mikro turbínami. V následujícím textu budou shrnuty výsledky několika experimentů, které slouží jako podklad pro vlastní návrh.

5.1 Specifické vlastnosti mikro turbín

Vodní mikro turbíny jsou zpravidla odvozeny z velkých turbín a jsou upravené pro menší měřítko. Kritéria pro výběr typu turbíny jsou prakticky stejná jako ve velkém měřítku. Určující je dostupný spád a průtok. Pokud je turbína zamýšlena jako zdroj elektrické energie, jsou požadovány co nejvyšší otáčky, aby bylo možné propojit hřídel přímo s generátorem bez převodovky.

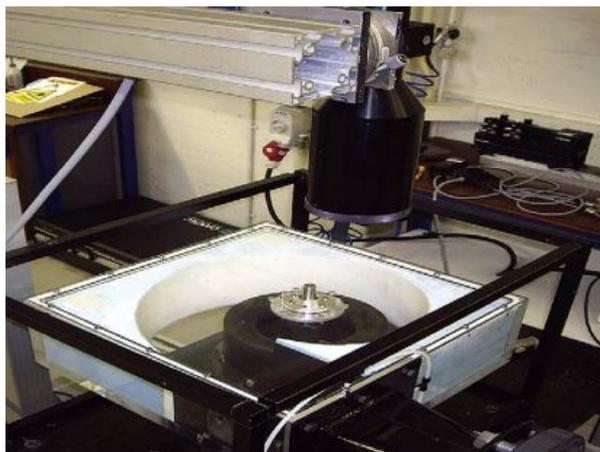
Existují ale i typy turbín výhradně určené pro malá měřítka. Jako příklad lze uvést takzvanou *vírovou turbínu*, která je principem podobná Kaplanově turbíně. Nepotřebuje rozváděcí lopatky a umísťuje se do kruhového prstence, nejčastěji společně s generátorem. Charakteristický tvar lopatek a uspořádání v prstenci je vidět na obrázku 5.1.



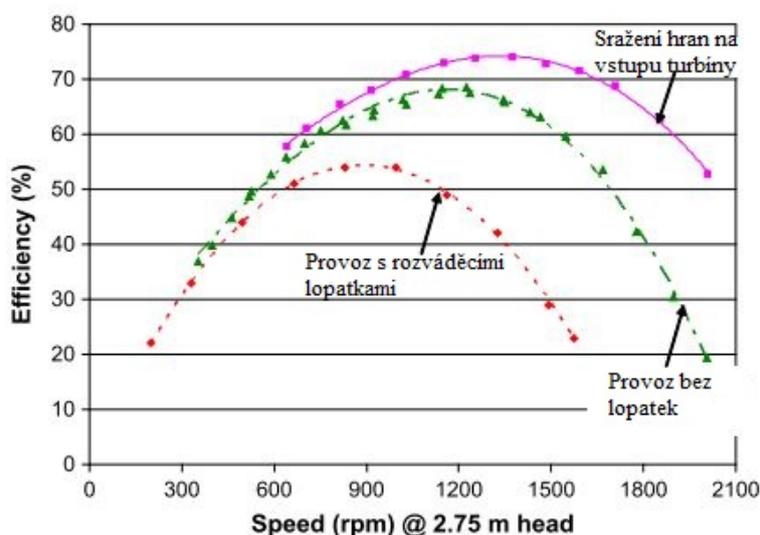
Obrázek 5.1. Malá vírová turbína vyrobená na VUT Brno (převzato z [17]).

Klasické přetlakové elektrárny většinou používají pro přívod vody spirálu kruhového průřezu a rozváděcí lopatky. Jejich mikro protějšky lze řešit zjednodušenou spirálou obdélníkového průřezu bez rozváděcích lopatek. Vhodným návrhem spirály lze dosáhnout uspokojivých výsledků, jak dokazuje studie [18]. Na obrázku 5.2 je vidět laboratorní instalace propelerové turbíny (200 W) do jednoduché kašny. Oproti velkým turbínám zcela chybí rozváděcí lopatky.

Výsledky modifikací turbíny jsou patrné z grafu 5.3. Je vidět, že odchýlení se od klasického schématu s rozváděcími lopatkami přineslo na malém stroji zvýšení účinnosti.



Obrázek 5.2. Laboratorní propelerová turbína (převzato z [18]).



Obrázek 5.3. Graf závislosti účinnosti na otáčkách (převzato z [18]).

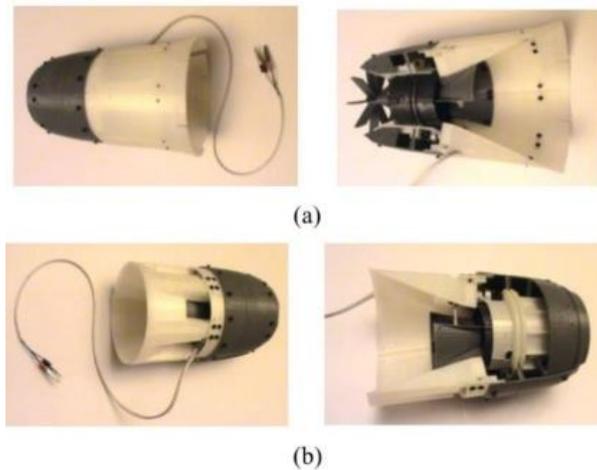
5.2 Prototypová výroba, experimentální provoz

Některé turbíny se vyrábí jen za účelem testování a modelování. Několik takových příkladů je shrnuto níže.

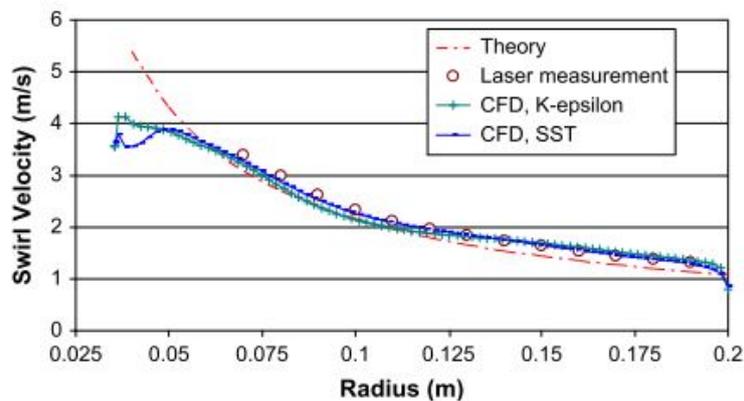
Modely turbín slouží ke sběru experimentálních dat a hledání optimálního návrhu. Příklad zkoušení různých modifikací turbíny je na obrázku 5.4. Turbína byla uložena v těle s výměnným konfuzorem na vstupu. Měření probíhalo opakovaně s různými tvary konfuzorů, aby bylo možné sledovat jejich vliv na výkon turbíny.

Dále se dají modely používat k ověření správnosti numerických simulací. Porovnání teoretických a naměřených hodnot dává dobrou představu o správnosti zvoleného matematického modelu. Experimentální výsledky ze studie [18] naměřené na propelerové turbíně v kašně byly porovnávány s teoretickými výpočty z CFD programu. Shodu výsledků lze posoudit na grafu 5.5.

Na modelových turbínách se dá pozorovat chování v mezních stavech. Na obrázku 5.6 probíhá pozorování kavitace a stability oběžných kol turbíny.



Obrázek 5.4. Několik variant uložení oběžného kola v těle turbíny (převzato z [19]).



Obrázek 5.5. Vynesené výsledky různých numerických metod společně s naměřenými hodnotami (převzato z [18]).

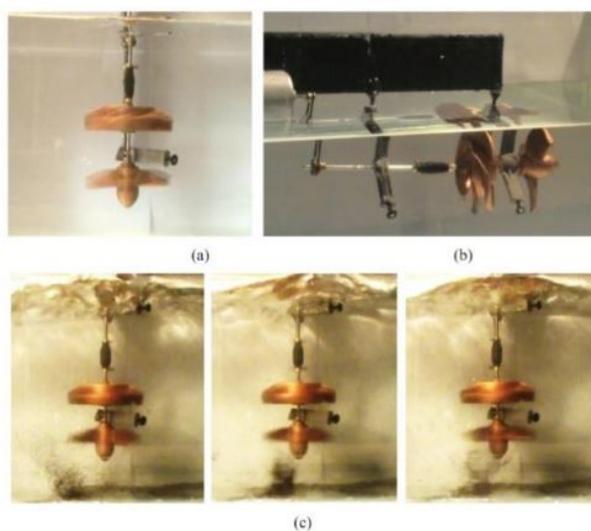
5.3 Turbíny na výrobu elektřiny

Následující turbíny neslouží pro modelování, ale mají za cíl ověření použitelnosti technologie 3D tisku při výrobě funkčních turbín.

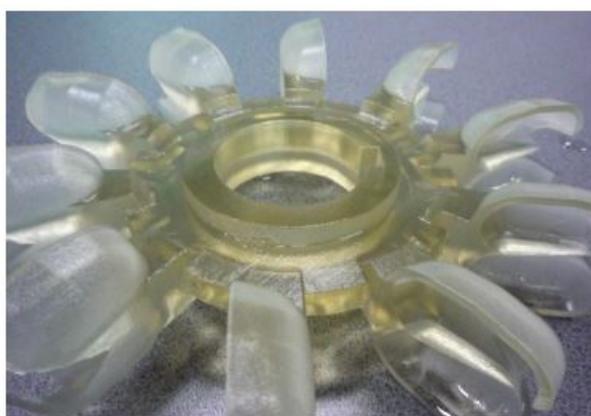
První práce dokumentuje návrh a výrobu oběžného kola Peltonovy turbíny na inkjet tiskárně [20]. Kolo o průměru 150 mm má drsnost povrchu $Rz = 5,6 \mu\text{m}$. Práce demonstruje, že je možné vyrobit zdravé monoblokové kolo pomocí 3D tisku z prášku.

Další publikace se věnuje výrobě miniaturní turbíny do vodovodních řadů, pro měření průtoků a napájení měřicích přístrojů [21]. Celá turbína má průměr jednoho palce a dokazuje schopnost inkjet technologie tvořit drobné a přesné komponenty. Na obrázku 5.8 je rozložená turbína vidět v porovnání s mincí. Minimální tloušťka stěny z inkjet tiskárny může dosáhnout až 0,2 mm.

Poslední příspěvek je *Archimedův šnek* vytvořený pomocí FDM technologie [22]. FDM je známa pro horší kvalitu povrchu a horší rozměrovou přesnost. Ve větším měřítku jsou nedostatky méně znatelné a je možné tvořit funkční díly. Výroba šroubové plochy tradičními metodami by byla časově náročná a pracná. Vytištění a složení segmentů



Obrázek 5.6. Na obrázku probíhá několik pokusů a) pozorování kavitace b) test stability c) mapování proudění pomocí částic. Obrázek z [19].



Obrázek 5.7. Pohled na finální, očištěné kolo Peltonovy turbíny vyrobené na stroji EDEN 350 (převzato z [20]).



Obrázek 5.8. Miniaturní turbínu na obrázku vytvořila tiskárna Projet 3510 (převzato z [21]).



Obrázek 5.9. Tělo šneku z tiskárny ROKIT-EDISON po povrchové úpravě (převzato z [22]).

šneku zaručí dostatečnou rozměrovou přesnost s minimální námahou. Na obrázku 5.9 je vidět tělo šneku potažené vrstvou laminátu, který chrání PLA výtisk před opotřebením.

Kapitola 6

Hydraulické řešení Bánkiho turbíny

Zkušební turbína bude typu Bánki, kvůli své jednoduché konstrukci a geometrii. Oběžné kolo bude monoblokové, vyrobené pomocí 3D tisku.

6.1 Předpoklady a vstupní parametry

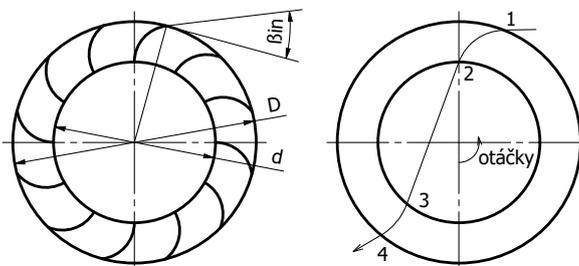
Tabulka 6.1. Tabulka obecně zadaných vstupních parametrů.

Zadané parametry	
H [m]	Spád
Q [m ³ /s]	Průtok
Ostatní parametry	
g [m/s ²]	Tíhové zrychlení
ρ [kg/m ³]	Hustota vody

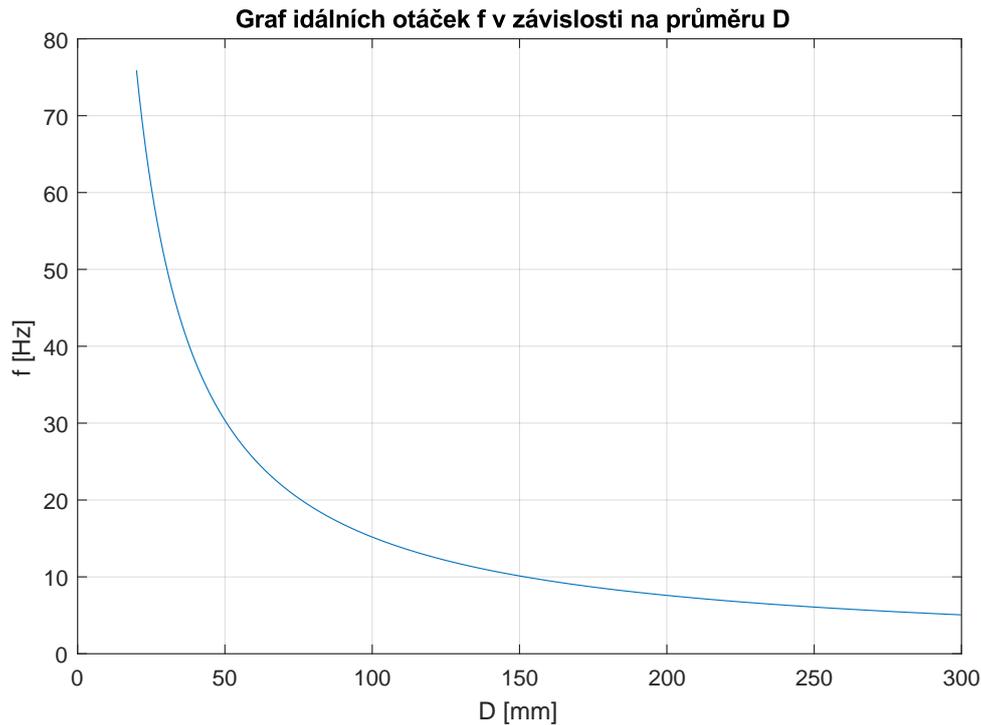
- Pro návrh turbíny bude platit předpoklad bezztrátového průtoku vodou.
- Návrh bude probíhat ve dvourozměrném prostoru.
- Do výpočtu nebude zahrnut přivaděč.
- Ztráty v přivaděči se projeví snížením tlaku na vstupu do turbíny, otáčky turbíny budou adekvátně upraveny podle reálných podmínek.
- Zjednodušení vstupu nebude mít vliv na výsledky měření, pokud se tlak bude měřit v dostatečné blízkosti před turbínou.

6.2 Návrh Bánkiho turbíny

Geometrie Bánkiho turbíny je velmi jednoduchá, jak je vyznačeno na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1. Geometrie Bánkiho turbíny s určujícími rozměry a přibližná dráha vodního paprsku. Na pravém obrázku jsou čísla vyznačena významná místa.



Obrázek 6.8. Na grafu je vykreslená závislost mezi otáčkami a zvoleným průměrem.

$$\eta = \frac{P}{P_h} \quad (29)$$

$$P_h = H \rho g Q \quad (30)$$

$$P = Q \rho c_{u1} u_1 \quad (31)$$

Rovnice (27) zajišťuje $c_{u4} = 0$, takže výkon turbíny závisí pouze na c_{u1} a u_1 . Dále je možné stanovit c_{u1} sloučením rovnic (24) a (26):

$$c_{u1} = c_1 \cos(\alpha_1) \quad (32)$$

$$c_1 = u_1 \frac{K + 1}{K \sqrt{1 - \sin^2(\alpha_1)}} \quad (33)$$

Dosazením do (29):

$$\eta = u_1^2 \frac{\cos(\alpha_1)}{H g} \frac{K + 1}{K \sqrt{1 - \sin^2(\alpha_1)}} \quad (34)$$

Podle rovnice (27) je $u_1 = u_1(K, \alpha_1)$, tím pádem je i účinnost funkcí $\eta = \eta(K, \alpha_1)$. Účinnost turbíny pro různé hodnoty K a α_1 je zobrazena na grafu 6.9. Z grafu je poznat, že pro nejvyšší účinnost bude dobré mít oba parametry co nejmenší. Zároveň je vidět, že účinnost citlivěji reaguje na změnu úhlu α_1 než na parametr K .

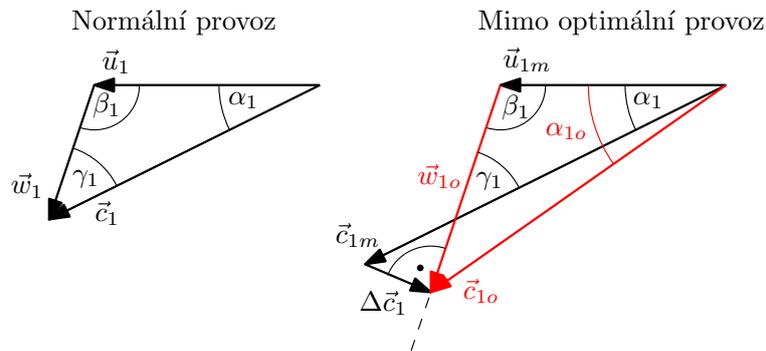
Doplňkový rozměr je výška trysky h , je to nejužší průřez trysky a zajišťuje správnou vstupní rychlost c_1 . Pro pozdější výpočty bude důležitý vztah:

$$c_1 = \frac{Q}{b h} \quad (36)$$

Návrh turbíny počítal s proudem vody nulové tloušťky, tedy s křivkou. Výpočet bude tím víc odpovídat realitě, čím menší bude hodnota ϕ .

6.5 Mimeooptimální provoz turbíny

Mimeooptimální provoz turbíny nastane, kdykoliv při daných otáčkách neprochází turbínou odpovídající průtok a naopak. Ideálně by k takovému stavu nemělo docházet a lze mu předejít změnou otáček nebo průtoku. Může se ale stát, že korekce není možná a turbína potom pracuje se sníženou účinností. Závislost účinnosti na f a Q se nazývá *charakteristikou turbíny* [7].



Obrázek 6.11. Obrázek zachycuje první rychlostní trojúhelník při mimeooptimálním vstupu vody.

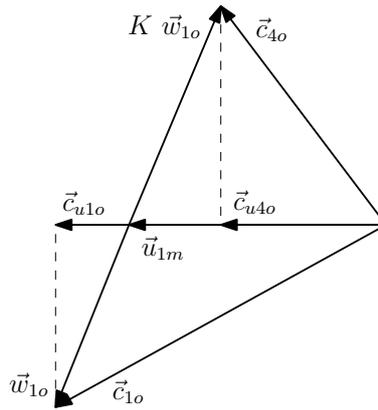
Indexy na obrázku 6.11 mají následující význam:

m ...mimeooptimální

o ...opravená

Jak je vidět z obrázku 6.11, voda nepřichází na lopatku tečně. Aby voda pokračovala správným směrem, působí na ni povrch lopatky normálovou silou a udělí rychlosti rázovou složku $\Delta \vec{c}_1$. Rázové jevy jsou obecně nežádoucí, protože produkují hluk a namáhají celou turbínu. Když je voda usměrněna, pokračuje ve směru opravené rychlosti \vec{c}_{1o} . Tvar trojúhelníku se ale změnil a to se projeví na účinnosti. Výkon podle rovnice (4) lze přepsat do podoby pro mimeooptimální stav. Výkon bude bilancí mezi vstupující rychlostí \vec{c}_{1m} a vystupující rychlostí \vec{c}_{4o} . Důvodem, proč do bilance vstupuje \vec{c}_{1m} a ne \vec{c}_{1o} je fakt, že voda při rázovém zpomalení odevzdává svou energii oběžnému kolu. Výkon rázové složky může být samozřejmě záporný, pokud by byl průtok nedostatečný. Na obrázku 6.12 je ale průtok nad optimální hodnotou a výkon rázové složky je kladný.

$$P_m = \rho Q u_1 (\| \vec{c}_{u1m} \| - \| \vec{c}_{u4o} \|) \quad (37)$$



Obrázek 6.12. Na schématu jsou naznačeny dva trojúhelníky při mimooptimálním provozu.

Všechny potřebné veličiny lze zjistit z geometrie na obrázku 6.12.

$$\gamma_1 = \beta_{in} - \alpha_1 \quad (38)$$

$$c_{1m} = \frac{Q}{h \cdot b} \quad (39)$$

$$u_{1m} = \pi \cdot D \cdot f_m \quad (40)$$

$$w_{1o} = u_{1m} \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\gamma_1)} + \cos(\gamma_1) \left(c_{1m} - u_{1m} \frac{\sin(\beta_1)}{\sin(\gamma_1)} \right) \quad (41)$$

Podle cosinové a sinové věty lze dopočítat zbylé hodnoty v opraveném trojúhelníku:

$$c_{1o} = \sqrt{w_{o1}^2 + u_{1m}^2 - 2 w_{o1} u_{1m} \cos(\beta_{in})} \quad (42)$$

$$\alpha_{o1} = \arcsin \left(\frac{w_{1o}}{c_{1o}} \sin(\beta_{in}) \right) \quad (43)$$

Účinnost se stanoví stejně jako v (29). Aby byly účinnosti srovnatelné je pro výpočet P_h potřeba znát *virtuální spád* H_m . Virtuální spád je takový spád, jaký by musela turbína zpracovávat, aby při daných otáčkách nastal požadovaný průtok. Hodnotu virtuálního spádu H_m lze stanovit z rychlosti c_{1o} , pokud se dosadí do rovnice (20) a vyjádří se H_m :

$$H_m = \frac{c_{1o}^2 (1 + \sin^2(\alpha_{1o}) (K^2 - 1)) + \xi^2 u_{1m}^2 (1 - \frac{1}{K^2})}{2 g} \quad (44)$$

Nyní lze do rovnice (29) dosadit a získat vztah pro účinnost turbíny v libovolném pracovním bodě určeném H_m, f_m .

$$\eta_m = \frac{\rho Q u_1 (c_{1m} \cos(\alpha_1) - |u_{1m} - K w_{1o} \cos(\beta_{in})|)}{H_m \rho g Q_m} \quad (45)$$

Hodnota k je charakteristický rozměr drsnosti kanálu.

Výpočtový skript v programu Matlab treni.m (elektronická příloha) používá uvedené rovnice pro stanovení dílčích ztrát v kanálech trysky a lopatek. Charakteristická rychlost proudění je v případě lopatek relativní rychlost w . Přechodová část trysky od délce l_k je numericky rozdělena na krátké úseky, jejichž ztráty jsou následně sečteny.

Výsledky konkrétního výpočtu jsou uvedeny v kapitole *Návrh zkušební turbíny*.

Kapitola 7

Návrh zkušební turbíny

7.1 Parametry turbíny

Jak bylo zmíněno, bude se jednat o Bánkiho turbínu. Odvození vztahů pro výpočet geometrie proběhlo v předchozí kapitole.

Tabulka 7.1. Tabulka vstupních parametrů pro návrh turbíny.

Zadané parametry
$H = 5 \text{ m}$ $Q = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
Ostatní parametry
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Zvolené parametry
$D = 150 \text{ mm}$ $K = 1,4$ $\alpha_1 = 15^\circ$ $\phi = 25^\circ$

Na základě odvozených rovnic byl sestaven skript turbina.m (elektronická příloha) v programu Matlab, který podle údajů v tabulce 7.1 vypočítá přidružené parametry turbíny 7.1, zatím bez zahrnutí třecích ztrát. Program vypočítá nominální hodnoty parametrů. Pokud se provozní stav bude lišit od zadaných hodnot, bude se výkon chovat podle grafů v následující sekci.

Tabulka 7.2. Tabulka přidružených parametrů turbíny.

$P = 202 \text{ W}$
$\eta = 0,82$
$f = 10,12 \text{ Hz}$

7.2 Geometrie turbíny

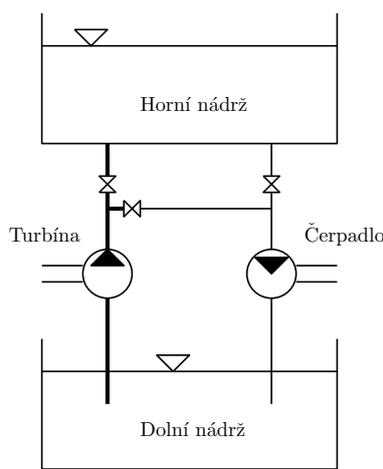
Úhel β_{in} a šířku b stanoví skript geometrie.m v programu Matlab (elektronická příloha), který používá rovnice (18), (27) a geometrické vazby na obrázku 7.1. Program vrátí rovněž radius lopatky ϵ .

Nyní jsou stanoveny všechny parametry potřebné pro konstrukci turbíny.

Kapitola 8

Návrh měřicí trati

Měřicí trať pro zkoušení turbíny musí splňovat zadané parametry. Především musí poskytnout spád $H = 5$ m a průtok $Q = 5$ l/s.



Obrázek 8.1. Schematický náčrt měřicí trati.

Obrázek 8.1 zobrazuje hlavní části měřicí trati. Tučně vyznačená větev potrubí u turbíny sestává z trubek o větší světlosti. To zajišťuje snížení ztrát v potrubí a pozvolnější vstup vody do trysky. Překlenovací větev umožňuje vedení vody přímo z čerpadla do turbíny. Bude tak možné zkoušet různé režimy provozu.

Návrh spodní nádrže s turbínou a čerpadlem z programu Autodesk Inventor je na obrázku 8.2. Vedení vody zajišťují PVC trubky $75 \times 3,6$ mm a $50 \times 2,4$ mm běžně dostupné na trhu s bazénovou technikou. Spodní nádrž je smontována ze dvou svařených polovin s vloženou přepážkou.

Horní nádrž lze zhotovit z libovolné, dostatečně objemné nádoby, připojením dvou hadičníků odpovídající velikosti.

Nedílnou součástí trati bude i čerpadlo. Vhodné bude volit čerpadlo pro bazénovou filtraci, taková čerpadla mají dostatečný výkon a jsou kompatibilní s PVC trubkami trati. Vhodné čerpadlo bude mít výkon okolo 1 kW a nominální průtok $Q \sim 20$ m³/hod, například Hanscraft Boxer 900¹.

8.1 Měření na trati

Pro ověření správnosti teoretických výpočtů a pro získání experimentálních dat je potřeba měřit tyto veličiny:

¹ <http://petr.olsak.net>

Kapitola 9

Závěr

9.1 Shrnutí práce

Hlavním cílem práce bylo navržení zkušební vodní turbíny a trati pro její experimentální provoz.

Úvodní rešerše z oboru hydroenergetiky a 3D tisku byla provedena za účelem získání informací pro úspěšný návrh turbíny. Podstatné informace jsou uvedeny v práci, hlubší pochopení lze získat studiem citované literatury.

Pro návrh turbíny byl vytvořen výpočtový model, schopný ze vstupních údajů H, ρ, g, Q vypočítat výkon a chování turbíny v různých režimech. Programy použité pro výpočty jsou přiloženy na CD.

9.2 Návrh

Aplikací odvozených vztahů a programů na zadané vstupní podmínky byly stanoveny všechny důležité hodnoty návrhu. Konkrétní návrh turbíny byl podroben analýze účinnosti a výkonu.

Největší ztráty vykazoval model turbíny při mimooptimálním provozu. To bylo možné očekávat vzhledem k tomu, že turbína nemá prakticky žádnou regulaci.

Hydraulické třecí ztráty tvoří přibližně 0,6% z výkonu při nominálním provozu. Naproti tomu ztráty z mimooptimálního provozu tvoří přibližně 10% při odchylce frekvence $\Delta f \sim 1$ Hz.

Vysokou účinnost tedy zajišťuje především správný provoz turbíny.

9.3 Výroba

Kompletní výkresová dokumentace turbíny je ve formátu .pdf přiložena na CD. Díly vyráběné MJF tiskem jsou mírně deformované a zmenšené oproti nominálním rozměrům. Při návrhu je potřeba počítat se smrštěním dílů a patřičně je zvětšit, nebo umožnit doladění vůlí při montáži. Skříň v podobě svařence je vhodné řešení a nepřináší žádné komplikace. Stejně tak součástky ze snadno obrobitelného hliníku.

Předběžné sestavení turbíny ukazuje, že kombinace výrobních technologií byla zvolena správně. 3D tištěné díly splňují požadovanou geometrii a jejich interakce s obráběnými a svařovanými díly je bezproblémová. Při dodržení dostatečných tolerancí lze 3D výtisky vkládat bez dalších úprav. Skříň z korozivzdorné oceli je náchylná na tepelné deformace při svařování. Díky malému výkonu turbíny není nárok vysokou na pevnost svarů, lze tedy provařovat do menší hloubky a vnášet méně tepla. Hliníkové díly splňují všechny rozměrové požadavky, včetně jakosti povrchu pro hřídelová těsnění. Malá tvrdost hliníku by mohla přinášet problémy na styku s ocelí nebo pod břity hřídelových těsnění, kde jsou součástky namáhány velkým tlakem nebo otěrem. Chování hliníkových a dalších součástek ověří až zkušební provoz na experimentální měřicí trati. Trať

Literatura

- [1] *Polovina Lipna jede opět na plný výkon, druhá prochází největší modernizací v historii.* 2016.
<https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/polovina-lipna-jede-opet-na-plny-vykon-druha-prochazi-nejvetsi-modernizaci-v-historii-44617>.
- [2] Jan Motlík, Libor Šamánek, Josef Štěkl, Jaroslav Váňa, Radim Bařinka a Miroslav Šafařík. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich využití v České republice.* 2003.
- [3] Pavel Štípský. *Malé vodní elektrárny (MVE) v ČR.* 2018.
- [4] Alkois Bournias Varotsis. *3D printing vs. CNC machining.*
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining/>.
- [5] ERÚ. *Spotřeba elektřiny v domácnostech na obyvatele ČR.*
<https://www.eru.cz/legacyerustaticdata/RZ2008/rz/elektrina/2.htm>.
- [6] Jiří Kaisler. *ČSN 75 120 Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky.* 2009.
- [7] Jan Melichar, Jan Vojtek a Jaroslav Bláha. *Malé vodní elektrárny.* 1998.
- [8] Josef Datel. *Aktuální stav hydrologického výzkumu.* 2011.
- [9] Jan Ježek, Blanka Váradiová a Josef Adamec. *Mechanika tekutin.* 2000.
- [10] Ibadullah Safdar, Sara Sultan, Hamza Ahmad Raza, Muhammad Umer a Majid Ali. *Empirical analysis of turbine and generator efficiency of a pico hydro system.* 2019.
- [11] Bryan R. Cobb a Kendra V. Sharp. *Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations.* 2013.
- [12] Budariso, Warjito, M. Naufal Lubis a Dendy Adanta. *Performance of a low cost spoon-based turgo turbine for pico hydro installation.* 2019.
- [13] Jahobr. *Water power.* 2020.
- [14] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen a David Hui. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.* 2017.
- [15] Jaroslav Foltýnek. *Prášková metalurgie a základy procesu slinování.* 2011.
- [16] s.r.o. L.K. Engineering. *Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk.*
<https://www.lke.cz/cz/mechanicke-vlastnosti-materialu-pro-3d-tisk/>.
- [17] Kateřina Růžičková. *Cena Inženýrské akademie za vynikající technický projekt za rok 2017 pro FSI.* 2017.
<https://www.fme.vutbr.cz/fakulta/aktuality/59104>.
- [18] A.A. Williams a R. Simpson. *Pico hydro – Reducing technical risks for rural electrification.* 2009.
- [19] A. Zahedi Nejad, M. Rad a M. Khayat. *Numerical and experimental investigations for design of a high performance microhydro-kinetic turbine.* 2017.

- [20] Razvan Udroui, Bogdan Deaky a Anisor Nedelcu. *Rapid manufacturing by polyjet technology of customized turbines for renewable energy generation*. 2011.
- [21] K. T. Adamski, J. W. Adamski, L. Urbaniak, J. A. Dziuban a R. D. Walczak. *3D Printed Miniature Water Turbine with Integrated Discrete Electronic Elements for Energy Harvesting and Water Flow Measurement*. 2018.
- [22] Tae Lee Kyung, Kim Eun-Seob, Chu Won-Shik a Ahn Sung-Hoon. *Design and 3D printing of controllable-pitch archimedean screw for pico-hydropower generation*. 2015.
- [23] David Štefan. *Hydraulické ztráty v potrubí*. 2009.
- [24] Aamer Nazir a Jeng-Ywan Jeng. *A high-speed additive manufacturing approach for achieving high printing speed and accuracy*. 2019.
- [25] Václav Kolář, Cyril Patočka a Jiří Bém. *Hydraulika*. 1983.

9.1 Seznam elektronických příloh

Bakalářská práce

BP_ HRON_ 2021 .pdf Text bakalářské práce ve formátu .pdf.

Skripty programu Matlab

funkce_df.m	Výpočet závislosti optimálních otáček na průtoku.
geometrie.m	Výpočet základních rozměrů turbíny.
charakteristika.m	Výpočet účinnosti a výkonu turbíny při mimooptimálním provozu.
otacky.m	Výpočet optimálních otáček.
prumer.m	Výpočet optimálního průměru.
treni.m	Výpočet třecích ztrát.
turbina.m	Výpočet přidružených parametrů turbíny.
ucinnost.m	Výpočet účinnosti různých návrhů turbíny.
ztraty.m	Výpočet celkových ztrát v turbíně.
PAR.mat	Soubor vstupních parametrů - zadání.
TUR.mat	Soubor zvolených rozměrů turbíny.
VYP.mat	Soubor kroků a rozsahů proměnných pro výpočet účinnosti.
Ph.mat	Matice hydroenergetického potenciálu.
Pzm.mat	Matice ztrátového výkonu třením.
Pzt.mat	Matice ztrátového výkonu při mimooptimálním provozu.
readme.txt	Návod na použití všech skriptů.

Výkresová dokumentace

BP_ 1_ 001.pdf	Oběžné kolo
BP_ 1_ 002.pdf	Tryska
BP_ 1_ 014.pdf	Okénko
BP_ 1_ 016.pdf	Výlevka
BP_ 1_ 020.pdf	Čep
BP_ 1_ 026.pdf	Disk brzdy
BP_ 1_ 051.pdf	Hřídel
BP_ 1_ 054.pdf	Lem

BP_ 1_ 055 .pdf	Víko skříně
BP_ 1_ 056 .pdf	Čelo skříně
BP_ 1_ 057 .pdf	Pata skříně
BP_ 1_ 058 .pdf	Bok skříně
BP_ 1_ 059 .pdf	Bok skříně
BP_ 1_ 060 .pdf	Unašič brzdy
BP_ 1_ 061 .pdf	Vložka oboustranná
BP_ 1_ 064 .pdf	Víko
BP_ 1_ 065 .pdf	Kryt víka
BP_ 1_ 066 .pdf	Vložka jednoduchá
BP_ 1_ 067 .pdf	Matice M17x1
BP_ 1_ 068 .pdf	Matice M12x1
BP_ 1_ 069 .pdf	Rameno páky
BP_ 1_ 070 .pdf	Rameno páky
BP_ 1_ 117 .pdf	Skříň (sestava)
BP_ 1_ 118 .pdf	Turbína (sestava)
BP_ 1_ 121 .pdf	Páka brzdy (sestava)
BP_ 1_ 123 .pdf	Vybavená hřídel (sestava)