

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní

Ústav energetiky

Studijní program: Energetika a procesní inženýrství



# Vývoj a experimentální ověření 3D tištěných vodních pico-turbín

## Development and experimental verification of 3D printed pico-sized hydroturbines

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Vilém Hron  
Vedoucí práce: Ing. Václav Novotný, Ph.D  
Rok: 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hron** Jméno: **Vilém** Osobní číslo: **482606**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**  
Specializace: **Energetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vývoj a experimentální ověření 3D tištěných vodních pico-turbín**

Název diplomové práce anglicky:

**Development and experimental verification of 3D printed pico-sized hydroturbines**

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat:

- Aktualizovanou rešerši aktuálního stavu výzkumu a vývoje v oblasti 3D tištěných vodních turbín ve světě
- Rešerši aplikačního potenciálu pro nasazení vodních turbín v „pico“ velikostech (pod 1 kW)
- Návrh, zprovoznění a dokumentaci k experimentální trati pro tyto vodní turbíny
- Experimentální analýzu vybraných vodních turbín, včetně dokumentace k nim
- Závěrečná shrnutí a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Václav Novotný, Ph.D. ústav energetiky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

\_\_\_\_\_  
Ing. Václav Novotný, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

*Název práce:*

**Vývoj a experimentální ověření 3D tištěných vodních pico-turbín**

*Title:*

**Development and experimental verification of 3D printed pico-sized hydroturbines**

*Autor:* Bc. Vilém Hron

*Rozsah práce:* 51 stran  
13 tabulky  
37 obrázků

*Akademický rok:* 2022/2023

*Studijní program:* Energetika a procesní inženýrství

*Studijní obor:* Energetika

*Ústav:* Ústav energetiky

*Druh práce:* Diplomová práce

*Vedoucí práce:* Ing. Václav Novotný, Ph.D

Ústav energetiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

*Klíčová slova:* vodní pico-turbína, 3D tisk, experimentální vodní turbína, charakteristika vodního stroje, zobecnění experimentálních dat

*Key words:* pico hydroturbine, 3D print, hydroturbine experimental run, hydro turbine characteristics, experimental data generalization

*Abstrakt:* Cílem této diplomové práce je experimentální ověření vodní pico-turbíny. Jedná se o Bánkiho turbínu vyrobenou progresivní technologií MJF 3D tisku. Experiment má poskytnout dostatek dat k sestavení věrohodné charakteristiky turbíny. Zobecněná data lze využít pro lepší odhad aplikačního potenciálu turbíny, nebo pro návrh dalších strojů teorií podobnosti. V práci nechybí rešerše podobných akademických článků, které poskytují cenná data ze stejného oboru. Krátký vhled do hydroenergetického potenciálu ČR a kalkulace ceny turbíny mohou být motivací pro reálnou aplikaci turbíny.

*Abstract:* The aim of this master's thesis is to thoroughly test a pico-sized hydro-turbine. The turbine in question is a Banki-type turbine manufactured progressively using MJF 3D printing. The experimental data obtained should provide enough insight to construct a turbine characteristic. Generalized data can be used to pinpoint the appropriate application domain or to design new turbines with a stronger theoretical background. A part of the thesis is dedicated to researching similar articles, which yield helpful data on the topic. A short excursion into the pricing of the turbine and application opportunities in the Czech Republic serves as motivation for a potential real-life application.

### **Čestné prohlášení**

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 .....

.....

Bc. Vilém Hron



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>1 Výzkum a vývoj vodních pico-turbín</b>	<b>11</b>
1.1 3D tištěné vodní pico-turbíny . . . . .	11
1.2 Vodní pico-turbíny . . . . .	13
<b>2 Aplikační potenciál vodních pico-turbín</b>	<b>16</b>
2.1 Hydroenergetický potenciál České republiky . . . . .	16
2.2 Technologie výroby a cena turbíny . . . . .	17
2.3 Ekonomika instalace turbíny . . . . .	19
<b>3 Experimentální zařízení</b>	<b>21</b>
3.1 Vodní turbína . . . . .	21
3.1.1 Geometrie turbíny . . . . .	21
3.1.2 Teoretický rozbor proudění v turbíně . . . . .	23
3.1.3 Experimentální turbína . . . . .	27
3.2 Měřicí trať . . . . .	28
3.3 Dynamometr . . . . .	30
3.3.1 Konstrukce dynamometru . . . . .	30
3.3.2 Elektrická zátěž . . . . .	32
<b>4 Zisk dat</b>	<b>34</b>
4.1 Měřené veličiny . . . . .	34
4.2 Měřicí hardware . . . . .	35
4.3 Měřicí software . . . . .	36
<b>5 Vyhodnocení dat</b>	<b>38</b>
5.1 Nejistoty v měření . . . . .	38
5.1.1 Měření průtoku . . . . .	38

5.1.2	Měření krouticího momentu a otáček . . . . .	39
5.1.3	Měření proudu a napětí . . . . .	41
5.1.4	Měření tlaku . . . . .	44
5.2	Vyhodnocovací software . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Výsledky měření</b>	<b>46</b>
6.1	Měření bez savky a těsnění . . . . .	46
6.2	Měření s těsněním . . . . .	47
6.3	Měření se savkou . . . . .	49
6.4	Shrnutí výsledků . . . . .	50
6.4.1	Účinnost . . . . .	51
6.4.2	Výkon . . . . .	51
	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam použitých symbolů</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použitých symbolů</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použitých symbolů</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použitých indexů</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>59</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>60</b>
	<b>Literatura</b>	<b>63</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>64</b>
	<b>A Vzhled uživatelského rozhraní a záhlaví výstupního souboru</b>	<b>64</b>



# Úvod

Voda je zdrojem obnovitelné energie, který se využívá již tisíce let. Vodní energie je relativně dobře dostupná, stabilní, má značný potenciál a lze ji snadno transformovat na mechanickou práci. Avšak v důsledku dlouhodobého využívání je potenciál větších vodních toků v civilizovaných částech světa téměř vyčerpán. Navíc velká vodní díla vyžadují rozsáhlé terénní úpravy a krajinné změny, které mohou být v současných podmínkách nepřijatelné. Oproti tomu v chudších státech, které hledají zdroje energie pro svou rostoucí populaci, jsou překážkou především vysoké investice. Ty se týkají jak výstavby zdroje, tak posílení celé elektrizační soustavy. V neposlední řadě chybí odborná pracovní síla, která by byla schopna projektovat a vést stavbu větších hydroenergetických děl.

Využívání malých potenciálů pomocí pico-turbín může být částečným řešením obou zmíněných problémů. Vyspělé státy mohou maximalizovat využívání obnovitelné energie vody z menších zdrojů, jako jsou zbytkové průtoky větších děl, odpadní toky nebo energeticky nevyužité vzdouvací objekty. V režimu ostrovního provozu v kombinaci s dalšími obnovitelnými zdroji energie, popřípadě diesel generátory, může být pico-turbína způsob, jak zajistit elektřinu v odlehlých vesnicích a komunitách méně rozvinutých zemí. V takovém případě je třeba dbát především na snadnou instalaci, dopravu a malou náročnost na údržbu.

Úvodem práce bude rešeršní část, která čtenáře seznámí se současným stavem vývoje a aplikací 3D tištěných vodních pico-turbín ve světě. Přehled stěžejních dat umožní čtenáři, aby si utvořil obrázek o dosahovaných účinnostech a výkonech, které tvoří dnešní standart.

Následuje krátký vhled do ekonomiky výstavby miniaturního vodního zdroje. Součástí je přibližná kalkulace ceny turbíny a její instalace podle vlastních zkušeností ze stavby prototypu.

V neposlední řadě bude součástí experiment, který bude spočívat ve výrobě a testování vodní turbíny vlastní konstrukce. Jedná se o Bánkiho turbínu s oběžným kolem o průměru 12 *cm* a šířce lopatek 7 *cm*. Testovací zařízení je schopné zajistit škálu průtoků a měřit výkon turbíny při různých otáčkách. Výsledkem měření bude výkonová charakteristika turbíny.

Výsledky experimentu budou následně porovnány s výsledky získanými z publikovaných studií, aby bylo možné posoudit účinnost a výkonnost konstrukce a případně navrhnout možná vylepšení. Tento experiment může být potenciálním investorům inspirací pro výzkum a vývoj vodních turbín pro malé aplikace.

Cílem této práce je přispět k poznání a šíření informací o vodních turbínách pro miniaturní aplikace a ukázat jejich potenciál v plnění energetických potřeb v méně rozvinutých oblastech a využívání obnovitelných zdrojů energie vyspělých států. Zároveň se zaměřuje na ekonomické a technické aspekty využívání pico-turbín a přináší konkrétní experimentální výsledky, které mohou být pro další výzkum a praxi užitečné.

# Kapitola 1

## Výzkum a vývoj vodních pico-turbín

Dnešní dostupnost 3D tisku motivovala většinu odvětví průmyslu k jeho využívání pro různé aplikace. Ať už se jedná o rychlé prototypování, výrobu náhradních dílů, nebo dokonce výrobu finálního produktu. Vznikla i řada výzkumných prací zkoumajících potenciál 3D tištění ve vodní energetice minimálních výkonů. Právě z těchto prací budou čerpána data jak pro porovnání s navrženou turbínou, tak pro představu o stavu výzkumu ve světě.

Ačkoliv je jádrem práce 3D tištěná turbína, nebudou z řešerše vynechány projekty využívající klasické výrobní metody. To umožní hlubší vhled do charakteristik vodních strojů a porovnání pokusné turbíny s obecně dosažitelnými výkony.

Mimo výzkumných a experimentálních strojů bude zmínka o výrobcích nabízených na trhu. Ty jsou ověřené provozem jejich design cílí především na účelnost místo na kreativitu a pokrokové technologie.

### 1.1 3D tištěné vodní pico-turbíny

Aplikace 3D tisku v hydroenergetické praxi není zatím běžná. Hlavním důvodem je zavedená výroba tradičními metodami lití, tváření nebo svařování, které předčí 3D tisk jak produktivitou, tak cenou. Dalším důvodem je velikost většiny současných elektráren, která nedovoluje hlavní komponenty tisknout. V neposlední řadě nemají vodní kola používaná v praxi tak komplexní tvary, aby byla opodstatněná výroba 3D tiskem.

3D tisk může ve stávající malé vodní energetice sloužit především k výrobě náhradních dílů. Historie některých elektráren sahá až do dvacátých let minulého století a náhradní díly nemusí být k dispozici [1]. V takovém případě, na kusovou výrobu, je možné uvažovat o 3D tisku. Příkladem mohou být součásti hydraulického systému řízení, nebo jiné odlitky.

Jako příklad možného využití 3D tisku v malé hydroenergetice lze uvést projekt bezlopatkové odvalovací turbíny *SETUR VORTEX* [2]. Její vývoj trvá již přes deset let a při výrobě počítá s využitím 3D tisku plastových komponent. Nutno ale dodat,

že 3D tisk není v konstrukci turbíny nepostradatelný a slouží coby prostředek pro výrobu prototypů.

Většina aplikací 3D tisku je soustředěna v akademické sféře. Jako nástroj prototypování a výroby modelů je 3D tisk nedostižitelný. V následujících odstavcích budou představeny akademické práce a jejich výsledky pro porovnání s vlastní turbínou.

Netradiční řešení turbíny v podobě šroubovicových lopatek na paraboloidní ploše představuje práce *Development turbine blade for ultramicro hydro power generation by 3D printer system* [3]. Zde byl 3D tisk využit pro výrobu zmenšeného experimentálního modelu turbíny. Cílem práce je důkladná analýza a výzkum proudění v turbíně pro zvýšení její účinnosti. Flexibilitu 3D tisku používá pro urychlení celého procesu modelování a zkoušení. Nominální parametry modelu jsou: spád 2,5 m a výkon 7 W. Měření na modelu byl stanoven maximální výkon 4,24 W při účinnosti 14 %.

Práce *Design and 3D printing of controllable-pitch archimedean screw for pico-hydropower generation* [4] testuje vodní turbínu na bázi Archimédova šroubu. Inovativní je design s proměnným stoupáním šroubovice, která je vyrobena 3D tiskem. Cílem je zlepšení účinnosti a omezení opotřebení abrazí díky lepšímu obtékání lopatek. Z experimentu vyplývá účinnost 71 % a výkon 123 W.

Další práce *Konzeption, Auslegung und Konstruktion einer Mikro-Propellerwasserturbine* [5] představuje vodní turbínu ve více tradičním slova smyslu. Jedná se o axiální turbínu o průměru 25 mm s rozváděcím stupněm, která má svou konstrukcí umožnit využití energie z odpadních toků a stokových sítí. Turbína je navržena jako malá bezúdržbová jednotka, kterou lze umístit do standardního odpadního potrubí HT050. Experimentem byl dosažen výkon 8,67 W a maximální účinnost 45 %. Test proběhl s několika variantami oběžného kola lišících se v počtu a tloušťce lopatek.

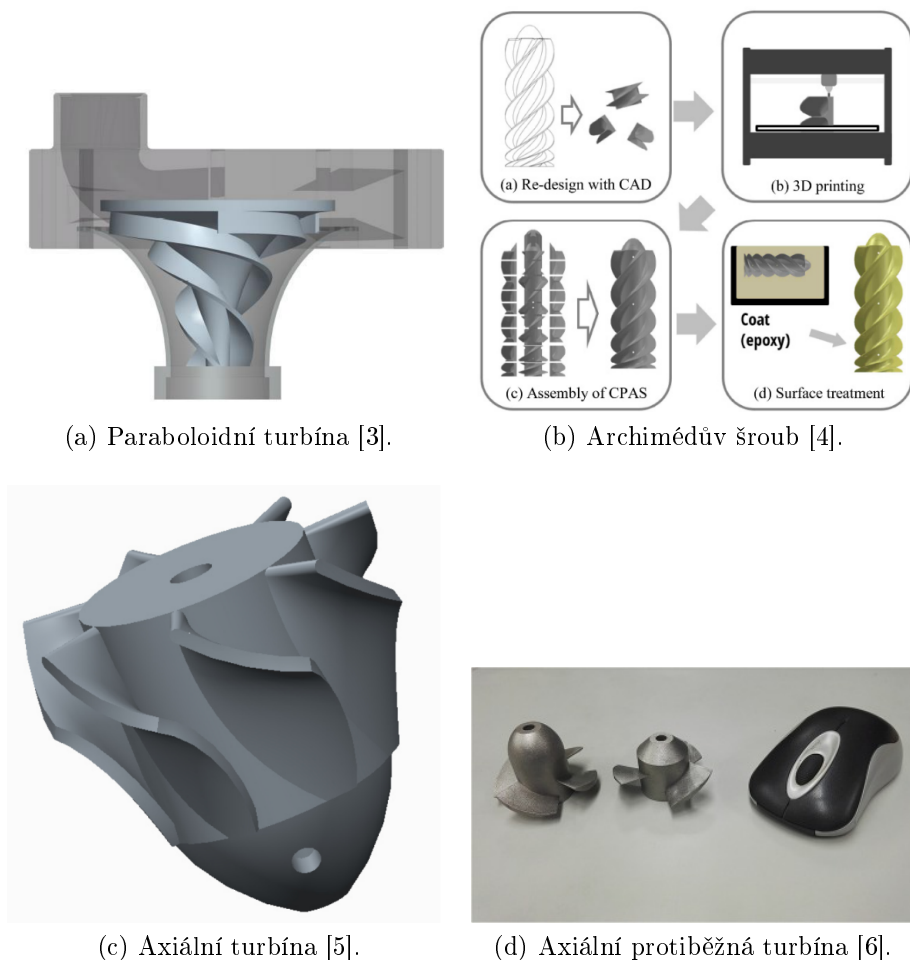
Druhou axiální turbínu, tentokrát s protiběžnými rotory, představuje práce *Study on performance of contra-rotating small hydro-turbine with thinner blade and longer front hub* [6]. Práce pojednává o experimentálním ověření vylepšeného designu picoturbíny s protiběžnými rotory o průměru 58 mm. Hlavním cílem má být zlepšení účinnosti stroje a zajištění odolnosti proti poškození cizími tělesy. Specifikum spočívá v řídkém lopatkování a velké tloušťce profilů dosahující 12 %. Maximální účinnost byla naměřena 64,7 % při výkonu přibližně 100 W.

Parametry citovaných prací jsou shrnuty v tabulce 1.1. Fotografie a vizualizace zmínovaných turbín jsou na obrázku 1.

Tabulka 1.1: Parametry dosahované v laboratorním provozu 3D tištěných turbín.

Projekt	Účinnost [%]	Výkon [W]
Paraboloidní turbína	14	4,24
Archimédův šroub	71	123
Axiální turbína	45	8,67
Axiální protiběžná turbína	64,7	100

Závěrem lze konstatovat, že 3D tisk nemá v hydroenergetice valné využití s výjimkou akademických prací a DIY projektů.



Obrázek 1: Obrázky 3D tištěných turbín z citovaných prací.

## 1.2 Vodní pico-turbíny

Oproti svým 3D tištěným protějškům mají klasické malé vodní stroje bohatou tradici v praxi. Malé a pico turbíny mají svůj vlastní trh s řadou výrobců po celém světě. Nabízené turbíny mají výkony od stovek wattů do stovek kilowattů. Na trhu jsou dostupné všechny známé konstrukce turbín: Peltonovy, Kaplanovy, Francisovy, šroubové, vírové a podobně. Vzhledem k abrazivnímu charakteru částic v říční vodě jsou konstrukčním materiálem turbín zpravidla kovy. Tomu odpovídají i výrobní technologie, které jsou diktovány tvarem kola, použitým materiálem a cenou.

Vlastní kategorií jsou čerpadla provozovaná v turbínovém režimu [7]. Jedná se o jednoduchý a dostupný způsob výroby elektřiny. Pochopitelně to není způsob vysoce efektivní, což je ale vyváženo velmi dobrou dostupností a nízkou finanční náročností.

Pro obsah práce jsou důležité především stroje odpovídající výkonem vlastní turbíně, kvůli lepšímu porovnávání. Následující odstavce prezentují několik příkladů turbín s výkony v řádech desítek nebo stovek wattů.

Z akademické sféry stojí za zmínku dva články týkající se komerčně dostupných turbín Turgo.

První práce *Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine* [8] vyšetřuje chování turbíny Turgo, která se běžně používá na vysoké spády, při spádu 3,5 m. Teoretickou analýzou a upravením stávající geometrie lopatek bylo dosaženo lepšího chování stroje při nízkém spádu. Experimentální data uvádějí výkon 150 W a účinnost až 91 %.

Druhá práce týkající se Turgo turbíny *An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response surface methodology* [9] vyšetřuje analyticky a experimentálně závislost účinnosti turbíny na počtu lopatek a úhlu proudu vody. Výsledkem optimalizace byla maximální účinnost 63,4 %. Výkon turbíny může dosahovat k hodnotám 1400 W.

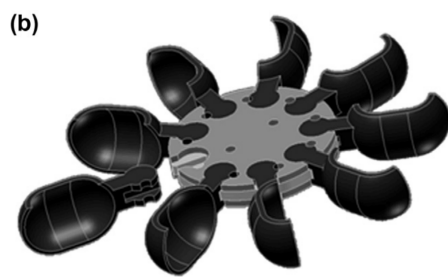
Jiná práce zkoumá komerčně dostupnou Peltonovu turbínu a závislost její účinnosti na průtoku. Práce *Determining turbine and generator efficiency of a Pico hydro system at different flow rate* [10] využívá testovací trať s oběhovým čerpadlem, které zajišťuje proměnný průtok vody turbínou. Výkon turbíny pohání elektrický generátor a je vyhodnocována celková účinnost systému. Pro potřeby diplomové práce je ale důležitá účinnost pouze turbíny. Data jsou dostupná jak pro generátor, tak pro turbínu a ukazují hodnoty výkonu 253 W a maximální účinnost turbíny 36,4 %.

Práce *Design and implementation of a crossflow turbine for Pico hydropower electricity generation* [11] se zabývá návrhem a experimentálním měřením Bánkiho turbíny. Z uvedených prací je to nejlepší kandidát na porovnání s vlastní turbínou stejného typu. Oběžné kolo má vnější průměr 230 mm a nominální otáčky 395 rpm. Turbína pracuje se spádem 5,2 m a průtokem 1,5 l/s. Nejvyššími dosaženými parametry byl výkon 50 W a účinnost přibližně 19 %.

Důležité parametry všech turbín shrnuje tabulka 1.2 a fotografie lze vidět na obrázku 2.

Tabulka 1.2: Parametry dosahované v laboratorním provozu pico-turbín různých druhů.

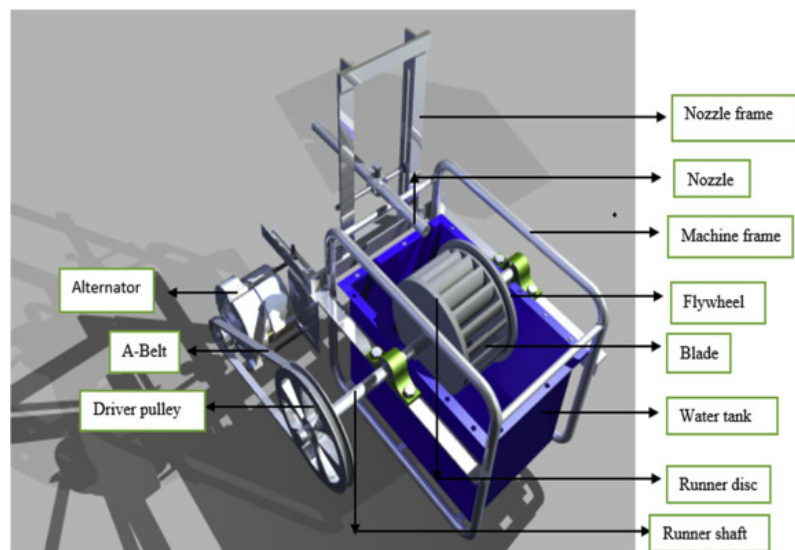
Projekt	Účinnost [%]	Výkon [W]
Upravená Turgo turbína	91	150
Kupovaná Turgo turbína	63,4	1400
Peltonova turbína	36,4	253
Bánkiho turbína	19	50



(a) Upravená Turgo turbína [8].



(b) Kupovaná Turgo turbína [9].



(c) Bánkiho turbína [11].

Obrázek 2: Obrázky pico-turbín z citovaných prací.

## Kapitola 2

# Aplikační potenciál vodních pico-turbín

Aby bylo možné vodní turbínu provozovat, a to zejména jestli má být ekonomicky životaschopná, musí být k dispozici dostatečně potentní vodní tok. Měřítkem vydatnosti toku je hydroenergetický potenciál, který udává energii, jakou v sobě tok nese. Část energie toku lze v turbíně přeměnit na mechanickou práci a proto mívá potenciál jednotku výkonu. Hydroenergetický potenciál závisí na charakteru krajiny, její kopcovitosti a podloží, a ročním úhrnu srážek. Obě tyto vlastnosti lze jen stěží ovlivnit a jsou dané od přírody. Z toho vyplývá fakt, že hydroenergetický potenciál daného území je konečný a vyčerpatelný.

Vodní energetika patří mezi obnovitelné zdroje energie a v dnešním společneskopolitickém klimatu má přehlížené ale důležité místo. Díky tlaku na maximální využívání obnovitelných zdrojů a technologií šetrných k přírodě se pozice vodních mikro a pico zdrojů v energetickém mixu zlepšuje. Důkazem je novela energetického zákona, která umožňuje provoz obnovitelného zdroje do 50 kW bez licence.

### 2.1 Hydroenergetický potenciál České republiky

Bývá pravidlem, že se energeticky využívají primárně velké toky, kde jde výroba elektřiny ruční v ruce s lodní dopravou, která rovněž benefituje z umělého vzdouvání hladiny řek. Výsledkem je vyčerpání potenciálu velkých toků. Pokud chce společnost efektivněji využívat obnovitelnou energii vody, musí se orientovat na menší a menší vodní zdroje. Taková posloupnost logicky musí dojít až k využívání pico-turbín, které jsou náplní této práce.

Celkový technicky využitelný hydroenergetický potenciál vodních toků v ČR se odhaduje na 3,38 TWh/rok [12], z toho bylo v roce 2021 využito 2,41 TWh [13]. To znamená, že hydroenergetický potenciál ČR je vyčerpán ze 70 %. S přihlédnutím k průměrné roční době využití vodních elektráren v ČR to znamená, že je možné nainstalovat ještě přibližně 450 MW vodních elektráren.



Taková bilance platí pro celkový potenciál ČR. Situace je různá pro velké a malé toky. Jako hranice se volí potenciální výkon  $10\text{ MW}$ , což je i hranice mezi vodní elektrárnou a malou vodní elektrárnou. Potenciál velkých toků je vyčíslen na  $1,81\text{ TWh/rok}$  [12], roční výroba energie za rok 2021 z velkých toků činila  $1,18\text{ TWh}$  [13]. To znamená že potenciál velkých toků je vyčerpán z 65%. V současné době se už v ČR nenachází vhodné lokality pro stavbu velkých vodní děl.

Malé toky nabízejí potenciál  $1,57\text{ TWh/rok}$  [12] a ročně využívají pouze  $1,23\text{ TWh}$  [13]. Procento využití malých toků je 78%. Obdobně jako pro celkovou bilanci lze stanovit přibližný výkon elektráren, který je možné nainstalovat:  $157\text{ MW}$ . Na rozdíl od velkých toků ale existují lokality, kde lze malé výkony využívat. Jedná se především o zrušené malé vodní elektrárny, energeticky nevyužitě vzdouvací objekty, hráze rybníků a podobně. Při volbě technologie je ale potřeba pamatovat na fakt, že téměř 90% potenciálních lokalit disponuje spádem  $5\text{ m}$  a nižším [14].

Přehledně zpracovaná data o nevyužitém hydroenergetickém potenciálu ČR nabízí *Analýza efektivního využití MVE z hlediska přírodního potenciálu vodních toků jako energetického zdroje* od Ministerstva životního prostředí.

## 2.2 Technologie výroby a cena turbíny

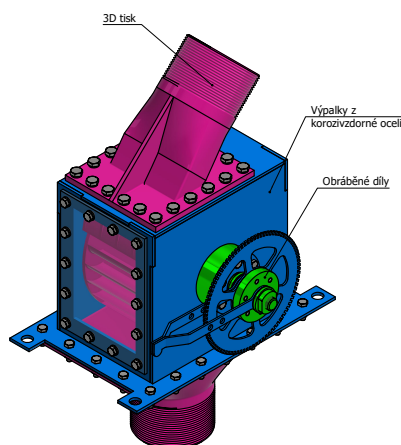
Hlavní části experimentální turbíny byly vyrobeny 3D tiskem metodou *MJF (Multi Jet Fusion)* z polyamidu PA 12. Jedná se o technologii tisku z práškového polotovaru. Ve vrstvách se nanáší prášek a pojivo, které po zatuhnutí tvoří finální výrobek. Nespojený prášek slouží jako přirozená podpora pro tisk.

Hlavní výhodou MJF je schopnost tisknutí libovolných převisů a komplexních detailů. Rozlišení tisku je dáno především granulometrií polotovaru a mívá hodnotu okolo  $80\mu\text{m}$  [15]. Výrobky z MJF tisku jsou v porovnání s klasickou extruzí pevnější. Uváděné pevnosti v tahu přesahují  $40\text{ MPa}$  [15]. Oproti technologiím využívajícím tavení materiálu je MJF tisk méně náchylný na deformace.

Vyrobená turbína je pouze prototypem a nereflkuje technologické a konstrukční požadavky sériového výrobku. Jak výběr materiálů, tak technologií byl podřízen dostupným výrobním prostředkům. Části turbíny, které by byly s největší pravděpodobností 3D tištěny MJF i v sériové výrobě, jsou tryska a oběžné kolo. Savka je na prototypu rovněž vyrobena MJF technologií, ale její tvar to nevyžaduje a vystačil by s technologií *FDM (Fused Deposition Modelling)*- klasickou extruzí. Jak je vidět na obrázku 3c, savku lze bez problému tisknout pomocí FDM a bez podpěr. Použitý materiál je PLA.

Naproti tomu skříň a hřídel turbíny by byly vyráběny z kovu. Skříň prototypu je svařena z korozivzdorných výpalků a hřídel je obrobena z duralové tyče. Použití materiálů odolávajících korozi není nutnou podmínkou a při výrobě více kusů by bylo ekonomičtější použití černé oceli s ochranným nátěrem. Náboje ložisek jsou díly, které lze obrábět z kovu nebo vyrobit FDM tiskem jako je na obrázku 3b. Při dnešním rozšíření FDM tiskáren a cenové dostupnosti filamentu je výhodnější použít 3D tisk.

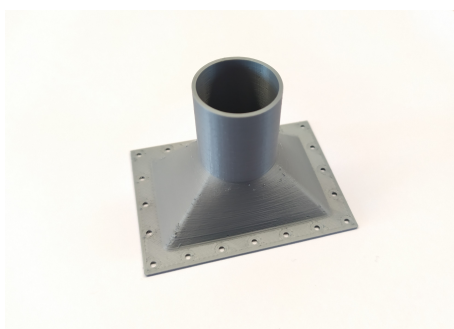
Materiálové složení experimentální turbíny společně s pokusným tiskem nábojových přírub je na obrázku 3.



(a) Použité materiály [16].



(b) FDM výtisk nábojů ve zmenšeném a skutečném měřítku.



(c) Pokusný tisk zmenšeného modelu savky pomocí FDM.

Obrázek 3: Ukázka materiálů experimentální turbíny.

Odhad ceny jednoho kusu turbíny vychází z rámcových cen technologií, materiálů a vlastní zkušenosti s výrobou. Část výdajů je známa z realizace, zbytek je odhadován z ceníků a běžných sazeb. Shrnutí je v tabulce 2.1.

Do spojovacího materiálu jsou zahrnuta ložiska, řemenice a další drobné kupované výrobky.

Přibližná cena vystrojené turbíny vychází na 15720 Kč. Velkou část ceny tvoří náklady na 3D tisk, jehož cena se s počtem vyrobených kusů snižuje jen málo. Při nasmlouvání výroby více kusů by se cena jistě dala snížit, ale nebude se jednat o velký rozdíl. Pro jednoduché odhady lze počítat s kulatou jednotkovou cenou 15000 Kč. Cena turbíny s instalací, pokud budeme uvažovat derivační připojení k toku, nebo využití stávajícího vzdouvacího objektu, vychází na 28500 Kč. Pokud by instalace měla zahrnovat zemní a jiné práce navíc, promítne se to ve zvýšení finální ceny. Nominální výkon turbíny je podle [16] 200 W, nicméně se současnou znalostí turbíny si dovoluji tvrdit, že se dá výkon zvýšit na 500 W e bez znatelného vlivu na cenu.

Tabulka 2.1: Kalkulace ceny komponent turbíny.

Položka	Technologie	Cena [Kč]	Počet kusů
Oběžné kolo	Výtisk MJF	5300	1
Tryska	Výtisk MJF	4400	1
Savka	Výtisk FDM	1200 [17]	1
Náboj	Výtisk FDM	170 [17]	2
Skříň- vypálení	Výpalek	460 [18]	1
Skříň- svaření	Svařenec	100 [19]	1
Hřídel	Obrobek	140 [20]	1
Spojovací materiál	Kupovaný	1200	1
Alternátor	Kupovaný	2500	1
Montáž	-	250 [20]	1
Potrubí, armatury	Kupované	5500	1
Instalace	-	8000 [21]	1

Výsledkem cenové kalkulace je přibližná hodnota 57000 Kč / $kWe$ .

## 2.3 Ekonomika instalace turbíny

Vodní turbína je obnovitelný zdroj energie a má nárok na státní podporu provozu. Pokud existuje v přijatelné vzdálenosti od spotřebitele vhodný vodní tok, je provoz malé vodní turbíny ekonomicky lákavý. Úplná analýza ekonomiky projektu přesahuje ambice této práce. Ale malý příklad instalace vodní turbíny k rodinnému domu ukáže, v jakých cenových relacích se pohybují investiční náklady. Pro porovnání je uvedena instalace podobně velkého fotovoltaického zdroje.

Porovnávacím kritériem bude shodné vyrobené množství energie za rok. Ze statistik Ministerstva průmyslu a obchodu lze získat představu o roční době využití obou zdrojů [13]. Pro malé vodní zdroje do 1 MW je to 35 % a pro fotovoltaiku 12 % průměrně za roky 2018 až 2021.

Modelový příklad bude uvažovat rodinný dům, který používá elektřinu na osvětlení a napájení. Vaření, topení a ohřev teplé vody je zajištěn z jiného zdroje. Roční spotřeba takového domu se bude pohybovat okolo 3000 kWh. Budeme-li uvažovat dokonalou akumulaci energie s přihlédnutím k roční době využití zdrojů, můžeme stanovit potřebný výkon zdroje. Roční elektrickou spotřebu domu by pokryla turbína o výkonu 0,98 kWe nebo fotovoltaika s výkonem 2,85 kWp.

Podle výše odvozené ceny vodní turbíny vychází pořizovací cena 57000 Kč. Měrné cena fotovoltaického systému je přibližně 35000 Kč /kWp [22], což pro modelový příklad vychází na pořizovací cenu 99750 Kč.

Uvedená kalkulace je velice primitivní a zahrnuje pouze náklady na instalaci zdroje, nikoliv na připojení k síti, vyvedení výkonu, akumulaci a mnoho dalších. Taky nezohledňuje rozložení výkonu a spotřeby během roku nebo dne, což má zásadní vliv na dimenzování výkonu zdroje a akumulační kapacity.

Příklad má sloužit především pro utvoření představy o finanční náročnosti zbudování malého vodního zdroje.

# Kapitola 3

## Experimentální zařízení

Experimentální část práce navazuje na bakalářskou práci [16], která obsahuje teoretický návrh, konstrukční řešení a výkresovou dokumentaci turbíny. Fyzický prototyp tou dobou ještě neběžel, takže provozní data nejsou součástí bakalářské práce.

Měření turbíny v různých provozních stavech je úkolem této diplomové práce. Cílem je sestavení charakteristiky vodní turbíny a porovnání dosažených výkonů s obdobnými experimenty z citovaných prací. Detailní matematický popis umožní řídit otáčky turbíny tak, aby dosahovala optimální účinnosti v různých režimech zatížení.

Nedílnou součástí je návrh měřicí trati, která bude schopna poskytovat a udržovat nastavené parametry. Snímání a zaznamenávání vybraných veličin zajistí elektronická čidla přes mikropočítač *Arduino Uno* [23].

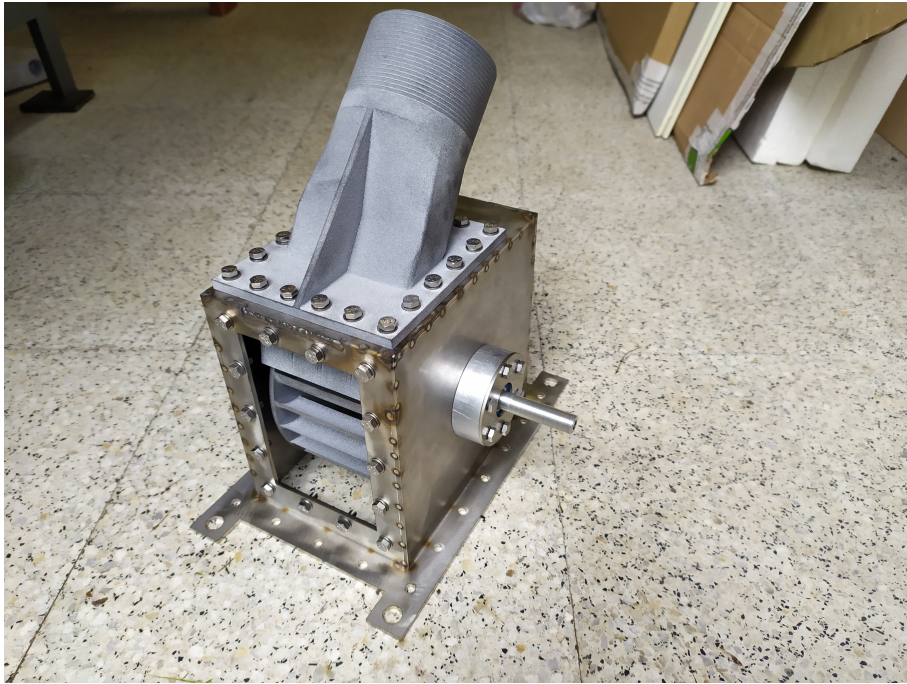
### 3.1 Vodní turbína

Pro experiment byla zvolena turbína typu Bánki. Její návrh není výpočtově náročný a proudění lze řešit ve dvou dimenzích. Další výhodou je její rovnotlaký charakter, který umožňuje jednodušší konstrukci skříně bez vysokých nároků na těsnost. Pravoúhlá konstrukce skříně s průhledovými okénky je vidět na obrázku 4. Všechny povrchy aktivně interagující s vodou jsou zhotoveny 3D tiskem.

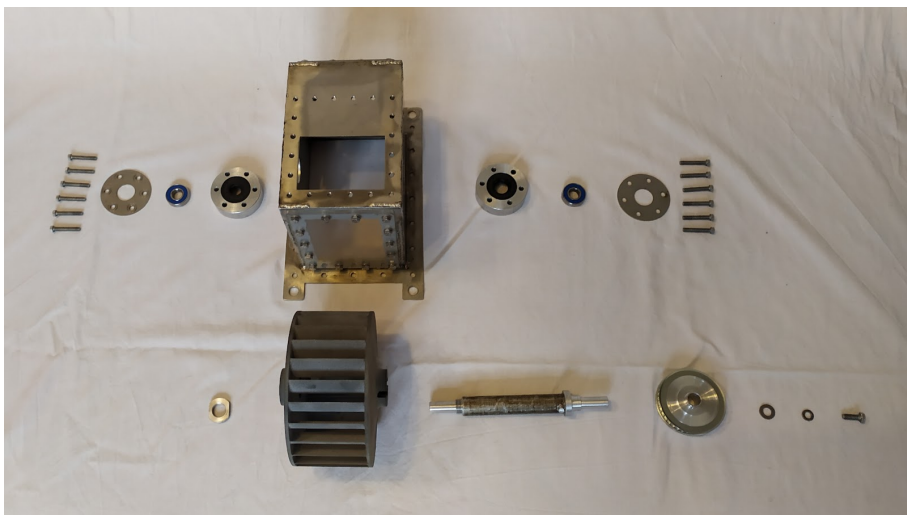
Turbína byla vyrobena 3D tiskem z práškového polyamidu na tiskárně *HPMJJF4200* a rám byl svařen z korozi-vzdorných ocelových výpalků. Turbínu lze složit pomocí třinácti šroubů, jak je vidět na obrázku 5.

#### 3.1.1 Geometrie turbíny

Kompletní návrh geometrie turbíny je obsahem bakalářské práce [16]. Nicméně základní poznatky z teorie proudění umožní snazší zpracování dat a proložení naměřených bodů odpovídajícími křivkami.



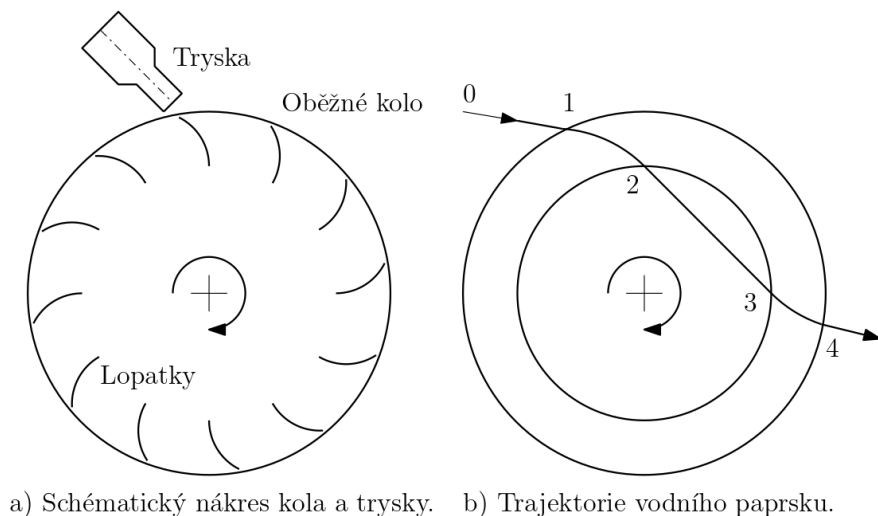
Obrázek 4: Poprvé složená turbína včetně trysky.



Obrázek 5: Rozložené součásti turbíny.

Základní princip fungování turbíny je patrný z náčrtku na obrázku 6. Voda přichází do trysky ve stavu  $0$  a má rychlost  $c_0$ , přetlak  $p_0$ . V trysce dochází k urychlení vody, při kterém se mění potenciální tlaková energie na energii kinetickou. V literatuře se Bánkiho turbína řadí mezi rovnotlaké turbíny. To znamená že se veškerá tlaková energie zpracuje na rychlost už v dýze a průchod kolem je při atmosférickém tlaku. Naproti tomu přetlakové stroje se vyznačují tím, že se voda urychluje a ztrácí tlak i v oběžném kole. Průchod vody mezi body  $1$  a  $2$  může mít při určitém návrhu turbíny přetlakový charakter. Nevzniká však velká chyba, pokud turbínu považujeme za zcela rovnotlakou [24]. Voda o atmosférickém tlaku tedy vstupuje na lopatky v bodě  $1$ , koná práci a opouští lopatky v bodě  $2$ . Následuje cesta vnitřkem kola, zjednodušeně

ji považujeme za přímku, a mezi body 3, 4 opět konání práce. Potom voda opouští turbínu buď savkou, nebo volným pádem na hladinu dolní nádrže.



Obrázek 6: Boční řez Bánkiho turbínou.

Zvláštností Bánkiho turbíny je dvojitý průchod vody skrze lopatky. To je také důvod, proč musí mít vnitřní konec lopatky radiální směr. Pro řízení větších turbín se používá speciální klapka, která dokáže proud vody seškrtnit nebo zastavit. Testovaná turbína má jednoduchou konstrukci a nemá řídicí orgány.

### 3.1.2 Teoretický rozbor proudění v turbíně

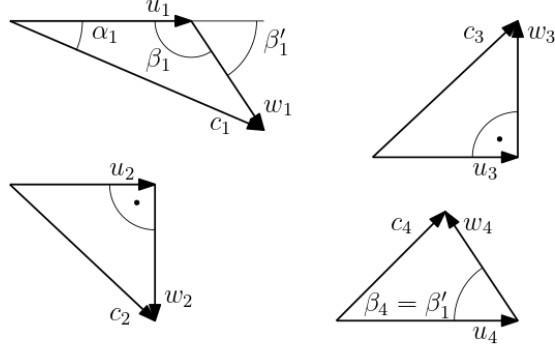
Základem rozboru jsou rychlostní trojúhelníky, které jsou v obecné podobě uvedeny na obrázku 7. Vektory na diagramu odpovídají rychlostem: *absolutní*  $c$ , *unášivé*  $u$  a *relativní*  $w$ . Absolutní rychlost vypovídá o energetickém obsahu vody a je měřitelná vnějším pozorovatelem. Unášivá rychlost je důsledkem otáčení oběžného kola a závisí na vzdálenosti od osy. Relativní rychlost je spojena s rotující vztažnou soustavou, její směr sleduje profil lopatky a velikost se bez vnějšího zásahu nemění.

Tvar rychlostních trojúhelníků se bude měnit podle zatížení turbíny. Konstantní zůstávají pouze úhly  $\beta_1$  a  $\beta_4$ , které jsou pevně dané konstrukcí.

Každá vodní turbína pracuje s určitou vstupní energií. Pokud se tato energie normuje na jednotku hmotnosti, pak mluvíme o *měrné energii*  $E$ :

$$E = gh + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} [J/kg] \quad (1)$$

Úkolem turbíny je přeměnit co největší část měrné energie na mechanickou práci. Jak velká část to bude určuje účinnost turbíny, vyjádřena bilancí:



Obrázek 7: Rychlostní trojúhelníky odpovídající bodům 1, 2, 3, 4 z obrázku 6.

$$\eta_t = \frac{W_t}{E} \quad (2)$$

Účinnost lze buď změřit, nebo předpovědět výpočtem. Výsledkem experimentu budou relevantní data, která umožní stanovit účinnost turbíny. Aby ale došlo k jejich správné interpretaci, je třeba provést odhad pomocí výpočtu. Reálné hodnoty poslouží jako korekční součinitele pro sestavení matematického modelu turbíny.

Měrná energie na vstupu, pokud považujeme turbínu za rovnotlakou, bude obsahovat pouze člen rychlosti:

$$E_1 = \frac{c_1^2}{2} \quad (3)$$

Výkon turbíny se získá z *Eulerovy turbínové rovnice* [7], která bilancuje energii vody na vstupu a na výstupu turbíny:

$$W_t = u_1 c_{u1} - u_4 c_{u2} \quad [J/kg] \quad (4)$$

$$W_t = u(c_{u1} - c_{u4}) \quad (5)$$

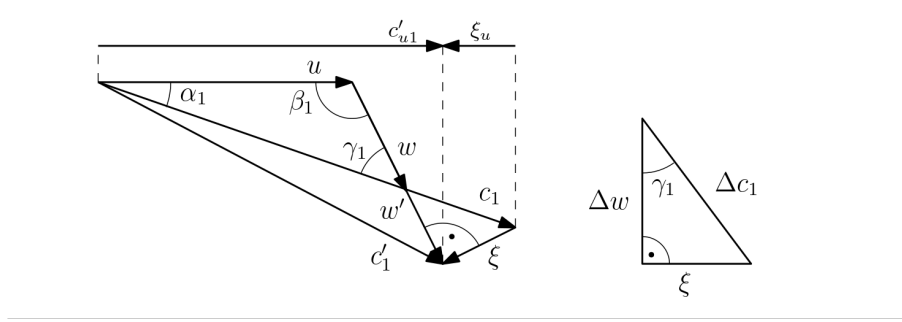
Kde rychlosti  $c_{u1}$ ,  $c_{u2}$  se nazývají meridiální složkou absolutní rychlosti a jsou rovnoběžné s unášivou rychlostí  $u = u_1 = u_4$  v daném místě. Výkon turbíny tedy závisí na vstupní rychlosti, otáčkách a výstupní rychlosti. Velikost a směr výstupní rychlosti lze odvodit z geometrie rychlostních trojúhelníků.

$$c_{u1} = u - \cos(\beta_1)w \quad (6)$$

$$c_{u2} = u - \cos(\beta_4)w \quad (7)$$

$$w = w_4 = w_1 = \sin(\alpha_1) \frac{u}{\sin(\gamma_1)} \quad (8)$$





Obrázek 8: Vstupní rychlostní trojúhelník při mimo optimálním provozním stavu.

Odchýlení od nominálního stavu bude nepochybně znamenat změny v proudění. Obrázek 8 ukazuje jak se bude měnit vstup vody pokud nebudou souhlasit otáčky turbíny se vstupní rychlostí. Normálovým působením lopatky se rychlost  $c_1$  stočí do správného směru  $\beta_1$ . Během rázové změny rychlosti se ztratí energie odpovídající rychlosti  $\xi$ . Ztrátový výkon způsobený změnou rychlosti o  $\xi$  se projeví v rovnici 5 jako záporná meridiální ztrátová rychlost  $\xi_u$ .

$$W_t = u(c_{u1} - \xi_u - c_{u2}) \quad (9)$$

Meridiální složka  $\xi_u$  zohledňuje fakt, že změna rychlosti  $c_1$  na  $c'_1$  je dotována z výkonu oběžného kola. Nově vzniklý trojúhelník sestává z rychlostí  $c'_1$ ,  $w'$  a neměnné  $u$ .

$$w' = w + \Delta w \quad (10)$$

$$\Delta w = \Delta c_1 \cos(\gamma_1) \quad (11)$$

$$\Delta c_1 = c_1 - \frac{u}{\sin(\gamma_1)} \sin(\beta_1) \quad (12)$$

$$\xi_u = c_1 \cos(\alpha_1) - u + w' \cos(\beta_1) \quad (13)$$

Všechny odvozené vztahy lze dosadit do Eulerovy rovnice, jak je uvedena ve vztahu 9.

$$w' = \sin(\alpha_1) \frac{u}{\sin(\gamma_1)} + \left( c_1 - \frac{u}{\sin(\gamma_1)} \sin(\beta_1) \right) \cos(\gamma_1) \quad (14)$$

$$W_t = u (w' (\cos(\beta_4) - 2 \cos(\beta_1)) - c_1 \cos(\alpha_1) + u) \quad (15)$$

Algebraickými úpravami je možné komplikovaný vztah zredukovat na následující rovnici:

$$W_t = K_2 u^2 + K_1 c_1 u \quad (16)$$

Jednoduchá analýza ukázala, že výkon turbíny je závislý primárně na obvodové rychlosti  $u$ , dané otáčkami. Jedná se o kvadratickou závislost, jejíž maximum ovlivňuje vstupní rychlost  $c_1$ , tedy průtok, v podobě lineárního koeficientu.

Koeficienty rovnice vychází z geometrie turbíny a jsou pevně dané konstrukcí. Jejich konkrétní hodnoty jsou v rovnicích 17 a 18.

$$K_1 = \cos(\gamma_1)(\cos(\beta_4) - 2\cos(\beta_1)) - \cos(\alpha_1) \quad (17)$$

$$K_2 = \left( \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\gamma_1)} - \frac{\sin(\beta_1)}{\tan(\gamma_1)} \right) (\cos(\beta_4) - 2\cos(\beta_1)) + 1 \quad (18)$$

Pokud se vrátíme k účinnosti definované vztahem 2 a dosadíme za výkon rovnici 16, získáme vztah:

$$\eta_t = \frac{K_2 u^2 + K_1 c_1 u}{c_1^2 konst.} \quad (19)$$

Rovnice 19 nám ukazuje, že účinnost bude mít rovněž podobu paraboly s maximem v témže místě jako rovnice výkonu.

Co se týče hledání maxima obou funkcí, lze využít vztah pro nalezení vrcholu obecné paraboly a aplikovat ho na konkrétní koeficienty. Společná hodnota obvodové rychlosti, respektive otáček, pro dosažení maximálního výkonu a účinnosti za daného průtoku je na následujících vztazích.

$$u_{Wmax} = -\frac{K_1 c_1}{2K_2} \quad (20)$$

$$W_{max} = -c_1^2 \frac{K_1^2}{4K_2} \quad (21)$$

Účinnost se získá opět dosazením příkonu z rovnice 3:

$$\eta_{max} = -\frac{K_1^2}{2K_2} \quad (22)$$

Z uvedených vztahů vyplývají dvě důležité skutečnosti pro interpretaci naměřených dat.

První je fakt, že maximum výkonu sleduje tvar paraboly procházející nulovým bodem a je závislé na rychlosti  $c_1$ , tedy na průtoku.

Druhá skutečnost ukazuje, že maximum účinnosti nastává při stejných otáčkách jako maximum výkonu. Zanedbáním ztrát vychází maximální dosahovaná účinnost stejná pro všechny průtoky. Z hlediska řízení je tedy vhodné udržovat turbínu vždy na maximálním výkonu pro daný průtok.

### 3.1.3 Experimentální turbína

Hlavní parametry turbíny jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Hlavní parametry turbíny.

Symbol	Hodnota	Popis
$H_z$	5 m	Zadaný spád
$Q_z$	5 l/s	Zadaný průtok
$D$	150 mm	Průměr rotoru
$n_n$	600 rpm	Nominální otáčky
$P_n$	200 W	Nominální výkon

Geometrie lopatek a trysky jsou vstupní data pro výše zmíněné výpočty. Hodnoty použité na experimentální turbíně jsou uvedeny v tabulce 3.2.

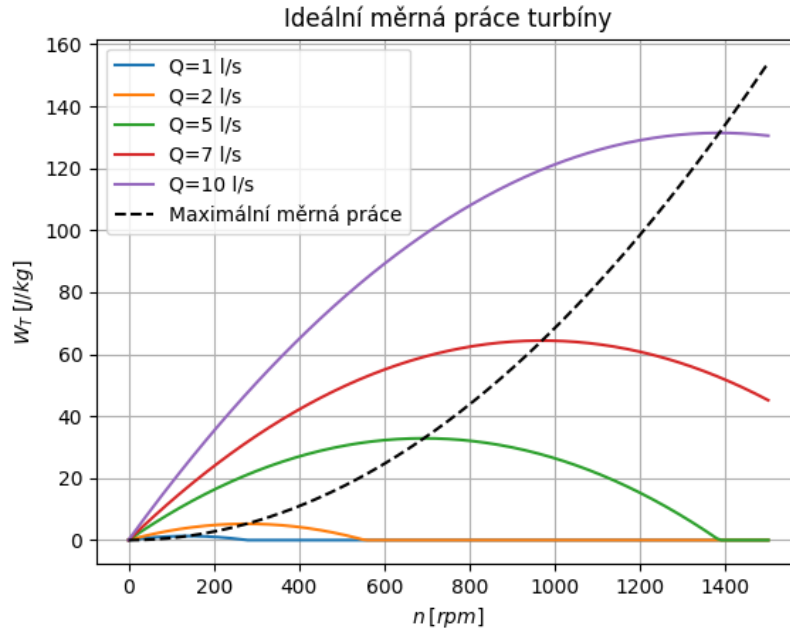
Tabulka 3.2: Geometrie experimentální turbíny.

Symbol	Hodnota	Popis
$D$	150 mm	Vnější průměr rotoru
$l$	69 mm	Šířka lopatek
$r_L$	22 mm	Poloměr zakřivení lopatek
$N_L$	24	Počet lopatek
$\beta_1$	147 °	Vstupní úhel lopatky
$\alpha_1$	15 °	Vstupní úhel vody
$A_D$	$5,91 \cdot 10^{-4} m^2$	Průřez dýzy

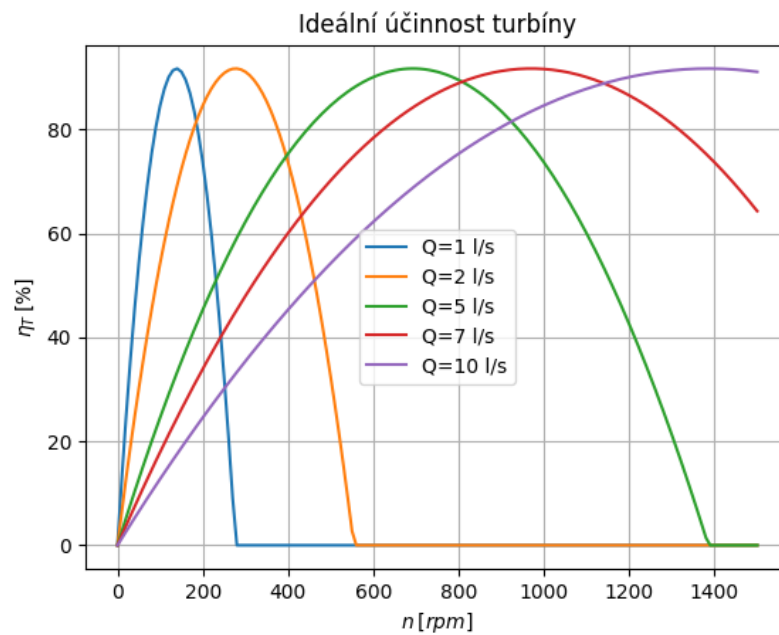
Konkrétní hodnoty umožňují sestavit graf pro ideální turbínu bez třecích a jiných ztrát. Arbitrárně zvolené hodnoty průtoku na obrázku 9 ukazují chování turbíny, které sleduje řadu parabol.

V dalším grafu 10 je vykreslena účinnost pro stejné hodnoty průtoků. Stejně jako u výkonu se jedná o paraboly. Účinnost dosahuje pro různé průtoky stejnou maximální hodnotu, což nemá fyzikální opodstatnění, přihlédneme-li k třecím a hydraulickým ztrátám.

Analýza proudění a oba grafy umožňují snazší vhled do chování turbíny a předpovídají průběhy obou veličin. Skutečné hodnoty se budou od teoretických lišit, ale měly by sledovat podobný trend. Dále nám analýza sděluje, že aproximační křivky pro data budou mít podobu polynomu druhého stupně.



Obrázek 9: Průběh měrné práce turbíny v závislosti na otáčkách.



Obrázek 10: Průběh účinnosti turbíny v závislosti na otáčkách.

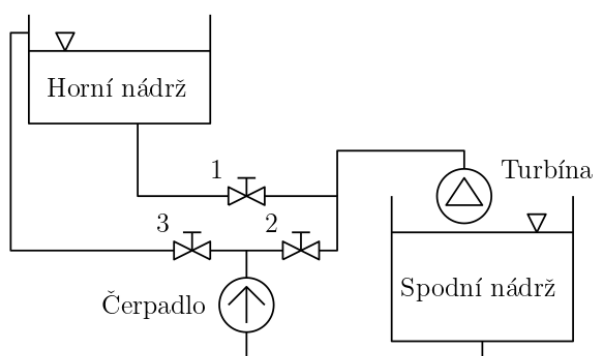
## 3.2 Měřicí trať

Trať zajišťuje oběh vody při odpovídajících parametrech a umožňuje měření průtoku  $Q$  a tlaku na vstupu do turbíny  $p_0$ . Měřicí trať je konstruována jako univerzální platforma pro testování dalších vodních strojů. Trať sestává z čerpadla, dolní svařované nádrže, horní plastové nádrže a PVC potrubí.

Zapojení trati je patrné na schématu 11. Ventily 1, 2, 3 umožňují jak přepínání režimů trati, tak řízení průtoku turbínou.

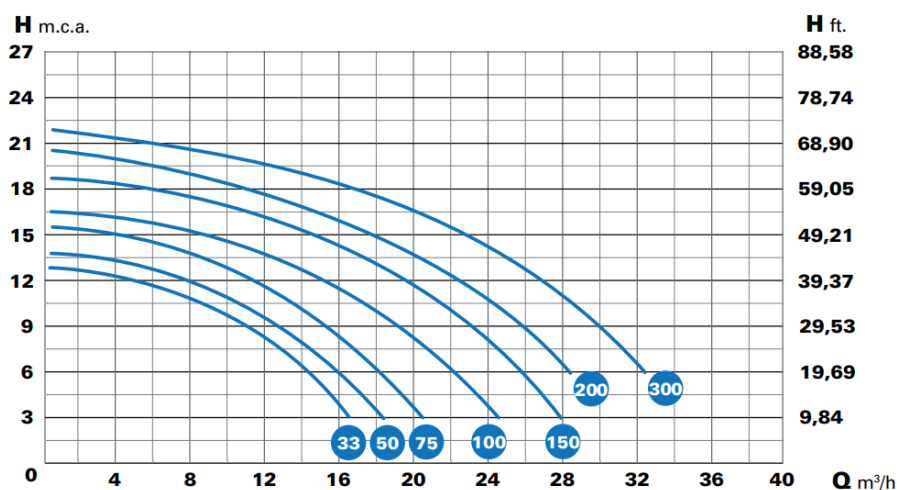
Režim přímého spojení čerpadla s turbínou vyžaduje uzavření ventilů 1, 3 a řízení průtoku probíhá škrcením na ventilu 2.

Režim zapojení horní nádrže se nastaví uzavřením ventilu 2, otevřením ventilu 3 a řízením pomocí ventilu 1. Horní nádrž je vybavena plovákovým snímačem hladiny, aby nedošlo k přetečení.



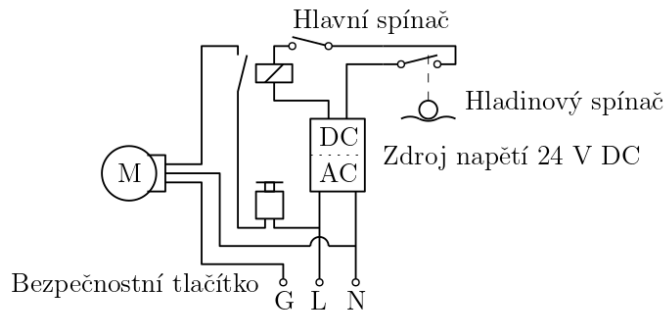
Obrázek 11: Schéma měřicí trati.

Oběh je poháněn odstředivým čerpadlem *Winner 200* s příkonem  $1,5 \text{ kW}$ . Charakteristika čerpadla určuje dosažitelné výkony celé trati a je uvedena na obrázku 12. Výkon čerpadla teoreticky umožňuje testovat turbíny o výkonech do  $1 \text{ kW}$ .



Obrázek 12: Charakteristika čerpadla Winner 200 [25].

Schéma zapojení silové elektřiny je na obrázku 13. Motor čerpadla je přes relé připojen na napětí  $230 \text{ V AC}$  a je možné ho nouzově vypnout bezpečnostním tlačítkem. Relé je napájeno ze zdroje  $24 \text{ V DC}$  přes obvod s hlavním spínačem a hladinovým čidlem. Zdroj stejnosměrného napětí zásobuje také mikropočítač Arduino a některá čidla.



Obrázek 13: Elektrické schéma zapojení čerpadla a ovládání.

Hlavní parametry měřicí tratě jsou shrnuty v tabulce 3.3. Maximální průtok je omezen kapacitou měrného přelivu. Úpravou přelivu lze teoreticky zvýšit průtok až k hltnosti čerpadla. Časové omezení provozu plyne z nadměrného zahřívání čerpadla, které nedostává optimální průtok vody kvůli regulaci škrcením.

Tabulka 3.3: Parametry měřicí tratě

Symbol	Hodnota	Popis
$Q_{trat,max}$	$8\text{ l/s}$	Maximální průtok tratí
$H_{trat,n}$	$3\text{ m}$	Nominální převýšení hladin nádrží
$p_{trat,max}$	$1,8\text{ bar}$	Maximální vstupní tlak do turbíny
$\tau_{trat,max}$	$40\text{ min}$	Maximální doba nepřetržitého provozu

### 3.3 Dynamometr

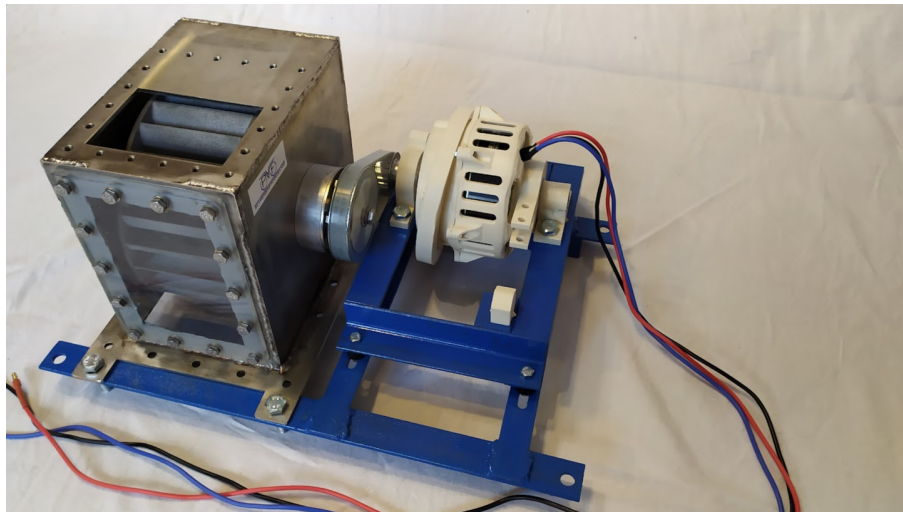
Zadáním práce byl požadavek na měření výkonu turbíny jak mechanickou, tak elektrickou cestou. První zmíněný způsob vyžaduje měření otáček a kroučícího momentu, což jsou hodnoty určující výkon. Druhá možnost je využití elektrického generátoru a následného měření proudu a napětí.

Dynamometr navržený pro experimentální trať je kompaktní celek schopný měření oběma způsoby. Je vybaven potřebnými čidly a komunikuje s počítačem přes mikro počítač Arduino. Řízení elektrické zátěže vyžaduje napájení  $24\text{ V DC}$ .

Spojení turbíny s dynamometrem přes ozubený řemen AT5 ukazuje obrázek 14.

#### 3.3.1 Konstrukce dynamometru

Design dynamometru ve velké míře využívá přednosti 3D tisku a jeho schopnost tvořit komplexní tvary a konstrukční prvky. Ve spojení s tradičními technologiemi obrábění a svařování tvoří ideální kombinaci pro tvorbu speciálních zařízení přímo na míru aplikaci.



Obrázek 14: Sestavený celek turbíny s dynamometrem.

Rám dynamometru je posuvně upevněn na svařovaném rámu turbíny. Změnou polohy dynamometru vůči turbíně lze podle potřeby napínat řemen, kterým je turbína se zátěží spojena.

Těleso dynamometru, jak je na obrázku 15, je uloženo kyvně ve dvou 3D tištěných ložiskových domečích. Kroutící moment je vyvozován přes váhový deformační člen a tím je zajištěno jeho měření. Jeden ložiskový domek obsahuje montážní bod pro indukční snímač polohy, s jehož pomocí je možné měřit otáčky stroje.

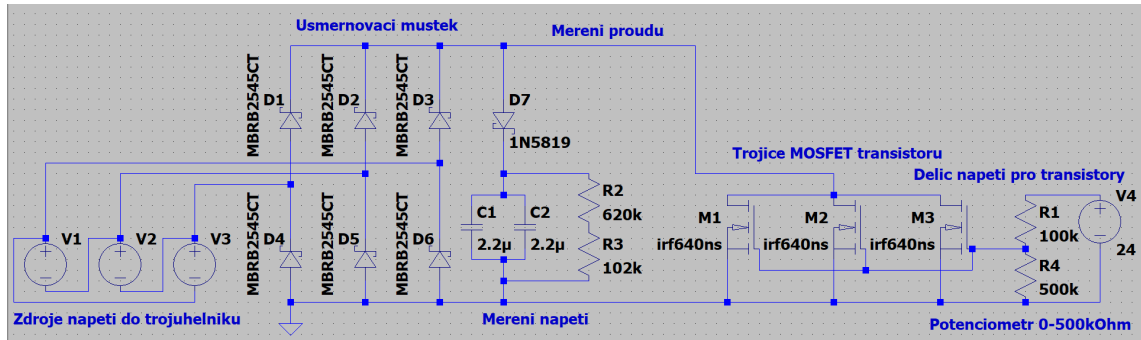


Obrázek 15: Těleso dynamometru na kyvných podporách před montáží.

Na hřídeli dynamometru se nachází synchronní motor *Multistar 9235-100*, který slouží jako elektrický generátor. Funkci mechanické zátěže má 3D tištěná čelistová brzda na téže hřídeli. Ovládání mechanické brzdy zajišťuje bowdenové lanko.

### 3.3.2 Elektrická zátěž

Elektrickou zátěž tvoří synchronní elektrický motor ve funkci generátoru o výkonu  $2,8\text{ kW}$ . Výstupem z motoru je třífázové napětí, které je usměrněno a zmařeno na říditelné zátěži. Schéma zapojení elektrické zátěže z prostředí programu *LTspice XVII* je na obrázku 16.



Obrázek 16: Schéma elektrického obvodu maření energie.

Na schématu je v roli motoru trojice zdrojů střídavého napětí spojená do trojúhelníku. Výstupem jsou tři fázové vodiče, které vstupují do měřicí a mařicí aparatury. Trojfázové napětí je nejprve usměrněno můstkem ze šesti diod. Jsou použity Schottkyho diody, které se vyznačují malým úbytkem napětí v propustném směru. Stejnoseměrné tepavé napětí je vedeno na paralelní trojici transistorů MOSFET, které slouží jako výkonový potenciometr.

Pro řízení MOSFETů je přítomný dělič napětí s vnějším napájením  $24\text{ V DC}$  a potenciometrem  $0 - 500\text{ k}\Omega$  pro ruční nastavení výkonu.

Proud se měří na vodiči se stejnosměrným napětím pomocí proudové sondy *ACS712* s napěťovým výstupem.

Měření napětí probíhá na označené odbočce, kde dochází k filtraci tepavého napětí a následnému dělení napětí na hodnotu přímo měřitelnou mikropočítačem Arduino.

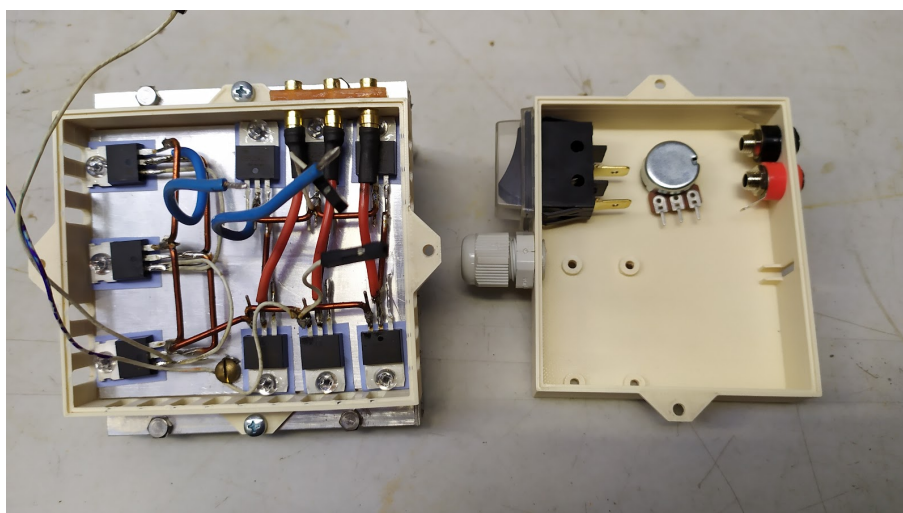
Energie z generátoru se v MOSFETech mění na teplo a je potřeba ji efektivně odvádět. K tomu slouží vodou chlazený tepelný výměník. Oběh vody zajišťuje akvarijní čerpadlo s průtokem  $300\text{ l/h}$ . Měrný výkon chladiče činí  $210\text{ W}/^\circ\text{C}$ , podle *Gnielenského korelace* pro proudění v trubce [26]. Všechny výkonové součástky jsou vodivě spojeny s chladičem a tvoří jeden celek, jak je vidět na obrázku 17.

Elektronika včetně měřidel je uzavřena v krabici. Pro používání elektrické zátěže je nutné připojit napájení  $24\text{ V DC}$  do banánkových zdírek. Měřená data se přenáší pomocí konektorů DuPont do mikropočítače a následně sériově přes USB do počítače.

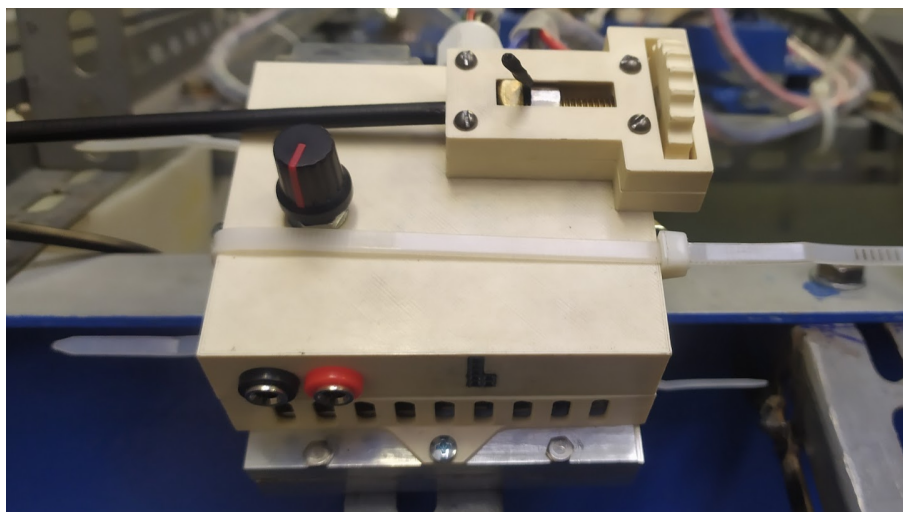
Ovládací prvky tvoří potenciometr, nebo alternativně kolečko mechanické brzdy. Kompaktní design je patrný na obrázku 18.

Technické parametry dynamometru jsou v tabulce 3.4. Proud a napětí se rozumí ve stejnosměrné části za usměrňovacím můstkem. Omezení otáček vychází z maximálního proudového respektive napěťového zatížení.





Obrázek 17: Chladič s krabičkou měřicí elektroniky.



Obrázek 18: Chladič s krabičkou měřicí elektroniky.

Tabulka 3.4: Parametry dynamometru.

Symbol	Hodnota	Popis
$U_{max}$	33 V	Maximální napětí
$I_{max}$	22 A	Maximální proud
$P_{el,max}$	375 W	Maximální výkon
$n_{dyn,min}$	350 rpm	Minimální otáčky
$n_{dyn,max}$	3500 rpm	Maximální otáčky

# Kapitola 4

## Zisk dat

Zisk experimentálních dat probíhá elektronickou cestou. Tím je zajištěna opakovatelnost a nezávislost měření na pozorovateli. Vysoká rychlost odečítání umožňuje měření větších objemů dat a statistickou eliminaci náhodných chyb.

Výčet dat z čidel zajišťuje mikropočítač Arduino s vlastním programem. Sériovou komunikaci s počítačem zajišťuje vlastní kód v programu *Python*. Uživatelské rozhraní poskytuje přehled o měřených hodnotách a umožňuje export naměřených dat v podobě csv souboru.

Zpracování dat probíhá rovněž v programu Python. Z dat jsou odfiltrovány nežádoucí hodnoty a zbytek je upraven do přehledných grafů. Program rovněž vyhodnocuje charakteristické křivky uvedené v sekci 3.1.2.

Všechny použité programy, včetně vysvětlujících a průvodních textů, jsou součástí digitální přílohy práce.

### 4.1 Měřené veličiny

Charakteristika turbíny je graf, který obsahuje informace o výkonu a účinnosti v závislosti na provozním stavu. Tyto dvě hodnoty nelze měřit přímo, ale dají se vypočítat z dalších měřitelných veličin.

Pro stanovení výkonu je třeba znát otáčky a krouticí moment na hřídeli:

$$P = M \frac{\pi n}{30} [W] \quad (23)$$

Další možností stanovení výkonu je měření elektrických veličiny vystupujících z generátoru. Jedná se o napětí a proud ve vztahu:

$$P = U_{ef} I_{ef} [W] \quad (24)$$

Definice účinnosti vyžaduje, kromě znalosti výkonu, rovněž znalost příkonu. Ten se dá stanovit úpravou rovnice 1. Tím pádem je třeba měřit rychlost a tlak vody společně s výškou určitého místa před turbínou. Celková energie vstupující do turbíny se měří v bodě 0 z obrázku 6. Proto je možné zanedbat výškový člen a získá se rovnice:

$$P_{in} = \left( \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \right) Q \rho [W] \quad (25)$$

$$P_{in} = \left( p + \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{A_{PS}} \right)^2 \rho \right) Q \quad (26)$$

Člen  $A_{PS}$  je průřez kanálu v místě odběru tlaku a dohromady s průtokem dává rychlostní člen rovnice. Celkovou vstupující energii lze stanovit měřením průtoku a tlaku.

Účinnost turbíny se pak stanoví následujícím vztahem:

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} \quad (27)$$

## 4.2 Měřicí hardware

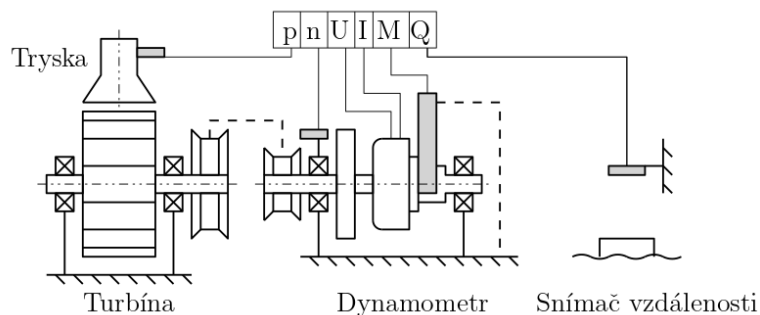
Na měřicí trati je možné měřit šest veličin. Jejich název společně s názvem měřidel a základní charakteristikou je v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Přehled použitých čidel.

Veličina	Název	Napájení	Výstup
$p$	Tlakové čidlo	24 V	Napětí 0 – 10 V
$n$	Indukční čidlo	5 V	Logický
$U$	Arduino	USB	Logický
$I$	Proudová sonda	5 V	Napětí 0 – 5 V
$M$	Deformační člen	5 V	Logický
$Q$	Snímač vzdálenosti	5 V	Napětí 0 – 5 V

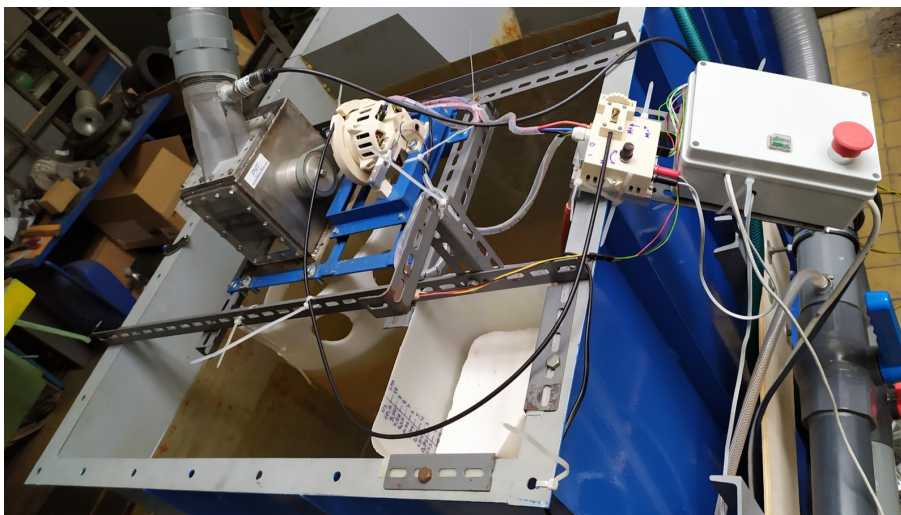
Napájení čidel 5V zajišťuje mikropočítač Arduino ze svého zdroje. Pro čidlo 24V je k dispozici odpovídající napětí ze stejnosměrného zdroje, který zároveň napájí spínací relé a řídicí potenciometr tranzistorů. Umístění čidel a místa odběru dat ukazuje obrázek 19. Čárkovanou čarou jsou zobrazeny mechanické vazby mezi řemenicemi a mezi deformačním členem a rámem.

Reálná podoba zapojení je vidět na obrázku 20. K provedení měření stačí připojit USB kabel do počítače a zahájit sériovou komunikaci. Celý měřicí aparát funguje



Obrázek 19: Schéma zapojení a instalace čidel na trati.

autonomně a je napájen střídavým napětím ze sítě. Je zajištěno jak napájení Arduina a čidel, tak i oběhového čerpadla. Mechanické propojení turbíny s měřením je zabezpečeno řemenovým převodem  $z = 40 : 18$ .



Obrázek 20: Schéma zapojení a instalace čidel na trati.

Elektrické zapojení konkrétních čidel je blíže popsáno v kapitole 5.1, kde je vyhodnocována přesnost měření.

### 4.3 Měřicí software

Měřicí software se dělí do dvou částí. První částí je kód v jazyce C, který běží na Arduinu a má na starosti výčet měřených veličin, jejich převod do logických hodnot a poskytování informací na sériové lince. Druhá část je napsána v jazyce Python a běží na počítači. Úkolem tohoto programu je získat a ukládat data ze sériové linky do úložiště počítače. Ovládání sběru dat se provádí přes uživatelské rozhraní programu, které ukazuje všechny potřebné údaje v přehledném schématu.

Komunikace mezi počítačem a Arduinem probíhá ve stylu *SPI* (*sériové periferní rozhraní*). Počítač v roli master a vysílá hodinový signál pro vyčítání dat. Arduino

v roli slave čeká na signál a následně provede měření a odeslání dat. Doba měření a přenosu dat počítaná od obdržení hodinového signálu je přibližně  $\tau_{serial} = 93 \text{ ms}$ . Právě tato hodnota určuje maximální možnou vzorkovací frekvenci systému.

Na počítači běží Python program *PKP\_GUI\_SERIAL*. Ten zajišťuje automatické vyčítání a ukládání naměřených dat. Jelikož některá čidla vykazují velké náhodné odchylky, je zavedena filtrace signálu mediánem. Všechny měřené hodnoty je možné v reálném čase sledovat v okně uživatelského rozhraní. Tam lze rovněž nastavit obnovovací frekvenci, míru mediánové filtrace a počet odebíraných vzorků. Vzorkem se rozumí označení žádaných hodnot ve výstupním souboru. Data jsou ukládána ve formě csv souboru. Pro sestavení kódu *PKP\_GUI\_SERIAL* byl využit online chat-bot *ChatGPT* [27].

Vzhled uživatelského rozhraní, stejně jako náhled do formátu výstupních souborů se nachází v příloze A.

Program *PKP\_SERIAL\_ARDUINO* běží v režimu slave na mikropočítači Arduino. Po přijetí hodinového signálu provede měření a vypíše jednu řádku do sériové linky. Řádka obsahuje všechny měřené hodnoty ve formátu string. Výstupní formát je čitelný pro lidi a díky tomu se dá měření provádět bez programu *PKP\_GUI\_SERIAL*. Pro vizuální odečítání dat stačí použít freeware *Arduino IDE* [28]. Pořadí vypsanych veličin je:  $p[\text{bar}]$ ,  $q[\text{l/s}]$ ,  $n[\text{rpm}]$ ,  $M[\text{Nm}]$ ,  $U[\text{V}]$ ,  $I[\text{A}]$ , .

Převod snímaných hodnot na fyzikální veličiny probíhá v Arduinu. Převodní vztahy jsou uvedeny v kapitole 5.1.

# Kapitola 5

## Vyhodnocení dat

### 5.1 Nejistoty v měření

Každé měření je zatíženo chybou. Aby bylo možné data z měření považovat za úplná, je třeba vyhodnotit jejich nejistotu. V této sekci budou uvedeny zdroje chyb a jejich zanesení do výsledku.

Ke zlepšení přesnosti měření pomohlo několik kalibračních procesů. Všechna kalibrační data jsou uvedena v excelových souborech v digitální příloze.

#### 5.1.1 Měření průtoku

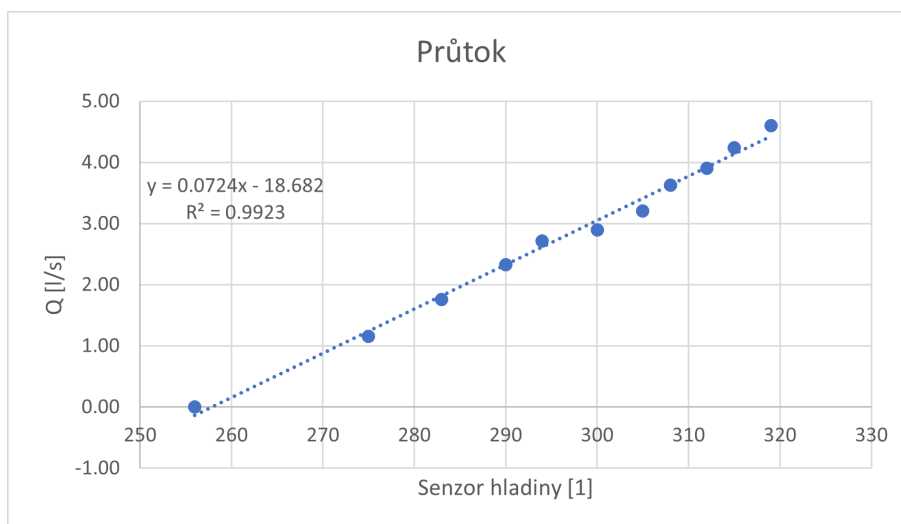
Průtok je měřen pomocí *Cipolettiho měrného přelivu* [29]. Měrné přelivy se využívají k měření průtoku malých vodních toků a jsou pro ně zpracovány korelační vztahy. Přehrazení dolní nádrže přelivem umožňuje podle výšky hladiny měřit průtok. Odečítání výšky hladiny zajišťuje infračervený senzor *GP2Y0A21YK0F* [30] s napěťovým výstupem.

Oficiální korelace mají ale platnost pouze při splnění určitých podmínek, které nelze dodržet v rámci měřicí trati. Proto je potřeba vytvořit vlastní kalibrační křivku. Pro stanovení průtoku byla použita kyblíková metoda se stopkami a osobní váhou.

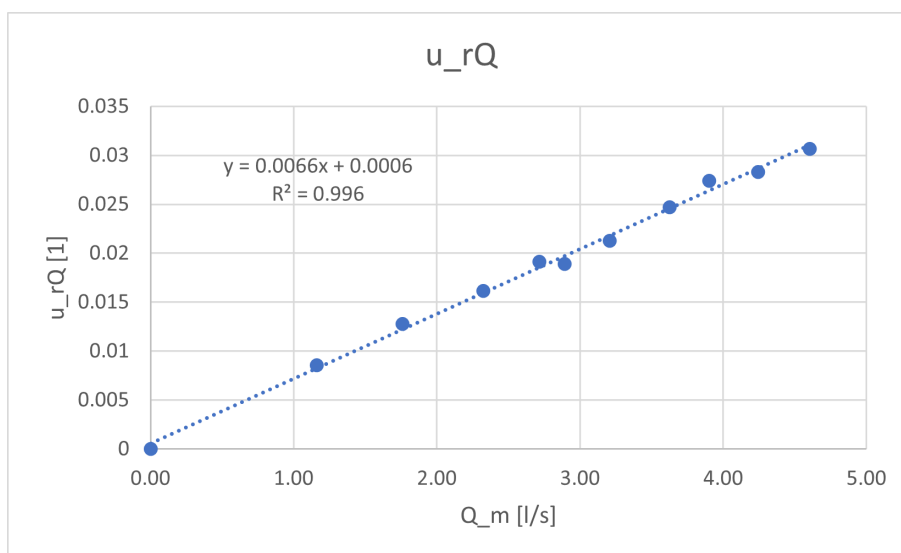
Výsledkem kalibračního měření je lineární závislost mezi signálem hladinového čidla a hmotnostním, ekvivalentně objemovým, průtokem. Měřená data a proložená přímka jsou na obrázku 21.

Co se týče nejistoty hraje největší roli měření času. Opakovaným měřením bylo zjištěno, že příspěvek náhodné chyby je zanedbatelný, stejně jako nejistota měření hmotnosti v porovnání s chybou měření času. Vzhledem ke kratším časům plnění kbelíku roste nejistota se zvyšujícím se průtokem. Chování nejistoty v závislosti na průtoku je vyneseno na obrázku 22. Proložená přímka bude sloužit při vyhodnocení jako uvažovaná chyba měření.

Rovnice pro stanovení relativní chyby měření průtoku:



Obrázek 21: Data naměřená při kalibraci průtokoměru.



Obrázek 22: Relativní chyba měření průtoků.

$$u_{rQ} = 6,6 \cdot 10^{-3}Q + 6 \cdot 10^{-4} \quad (28)$$

Interpolací získaná rovnice průtoků v závislosti na signálu čidla, kde  $d_Q$  je počet dílků z integrovaného převodníku:

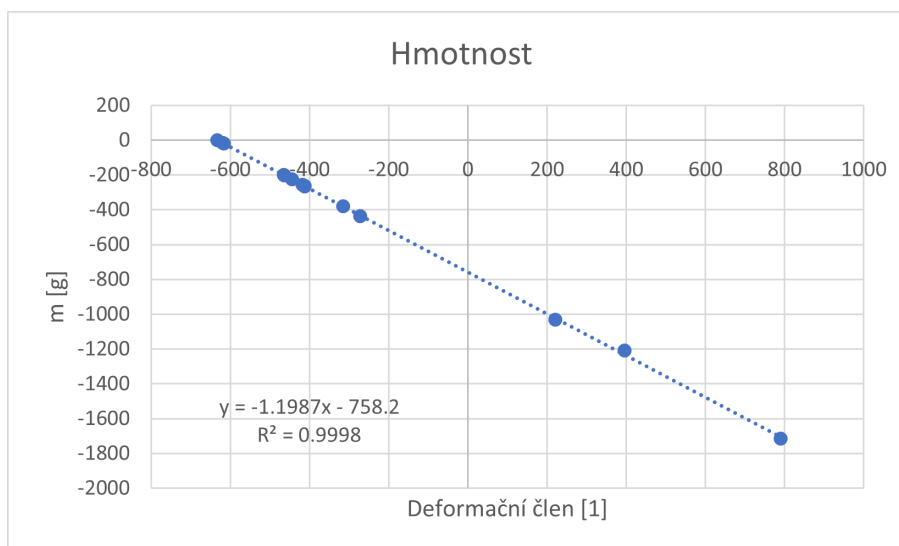
$$Q = 7,24 \cdot 10^{-2}d_Q - 18,682 \text{ [l/s]} \quad (29)$$

### 5.1.2 Měření krouticího momentu a otáček

Moment je měřen pomocí váhového deformačního členu. Dynamometr je uložen v ložiskách a moment se do rámu přenáší přes deformační člen. Se znalostí délky

ramene  $r$ , převodového poměru  $z$  a velikosti působící síly se dá stanovit kroučící moment na hřídeli.

Pro načítání dat z tenzometrického můstku je použit 24 bitový AD převodník *HX711* [31]. Zkušební měření bylo zjištěno, že deformace váhového členu neodpovídají údajům z produktového listu, takže se rovněž přistoupilo ke kalibraci. Kalibrační data s proloženou přímkou jsou na obrázku 23. Deformační člen je kvůli montáži orientován opačně, než se předpokládalo a proto je směrnice přímky záporná.



Obrázek 23: Data naměřená při kalibraci deformačního členu.

Nejistota měření je tentokrát nezávislá na velikosti měření a vychází z přesnosti použitých vah  $u_{LC} = 0,58 \text{ g}$ .

Délka ramene dynamometru je  $r = 100 \text{ mm}$  a nejistota měření posuvným měřítkem  $u_r = 0,06 \text{ mm}$  [32].

Obě chyby měření jsou v relativní podobě srovnatelné a proto je třeba počítat s kombinovanou nejistotou při stanovení kroučícího momentu.

$$u_{rM} = \sqrt{\left(\frac{u_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{u_{LC}}{M}\right)^2} \quad (30)$$

$$u_{rM} = \sqrt{3,3 \cdot 10^{-7} + \frac{3,2 \cdot 10^{-7}}{M^2}} \quad (31)$$

Podle [32] je vhodné používat dílčí relativní nejistoty. Absolutní chyba deformačního členu je konstantní, ale relativní se mění se zatížením. Proto je celková nejistota závislá na měřené hodnotě kroučícího momentu.

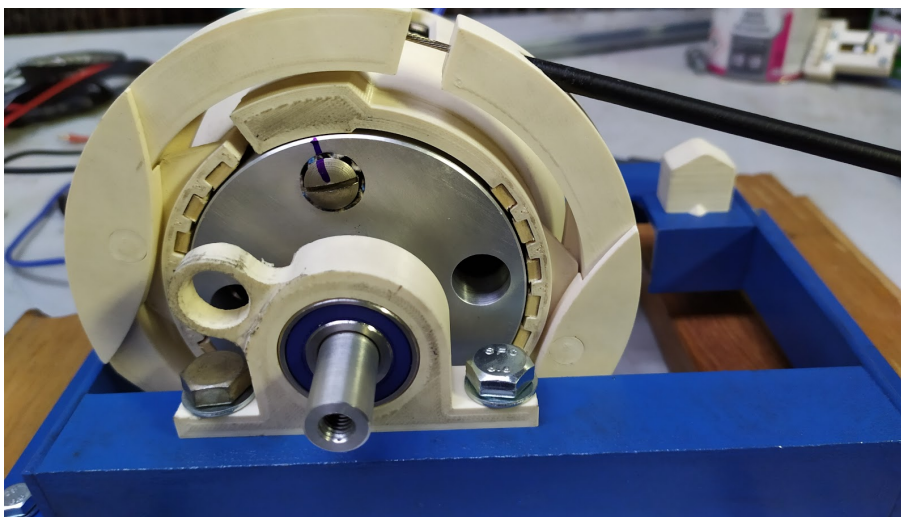
A konečně vztah pro výpočet momentu z naměřených dat se započtením tíhového zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  a převodového poměru  $z = 40 : 18$ .



$$M = -2,6132 \cdot 10^{-3}d_M - 1,653 [Nm] \quad (32)$$

Měření otáček zajišťuje indukční čidlo *LJ12A3-4-Z/AX* [33]. V disku brzdy se nachází dvě feromagnetické značky, které budí dva pulzy každou otočku. Jejich poloha je vidět na obrázku 24. Otáčky hlídá funkce *Interrupt* [34] v rámci programu pro vyčítání dat na mikropočítači Arduino. Vyhodnocení otáček probíhá čítáním pulzů za časový interval. To znamená, že čím jsou menší otáčky, tím větší chyby je možné se dopustit. Program proto upravuje časový interval tak, aby zachoval maximální nejistotu měření pod hodnotou  $u_{rn} = 0,01$ . Tím pádem je možné považovat nejistotu měření otáček za konstantní:

$$u_{rn} = 0,01 \quad (33)$$

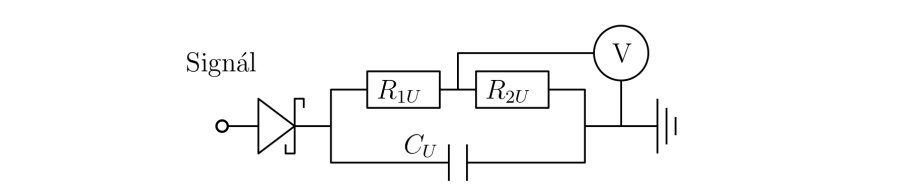


Obrázek 24: Umístění ocelových značek na disku brzdy.

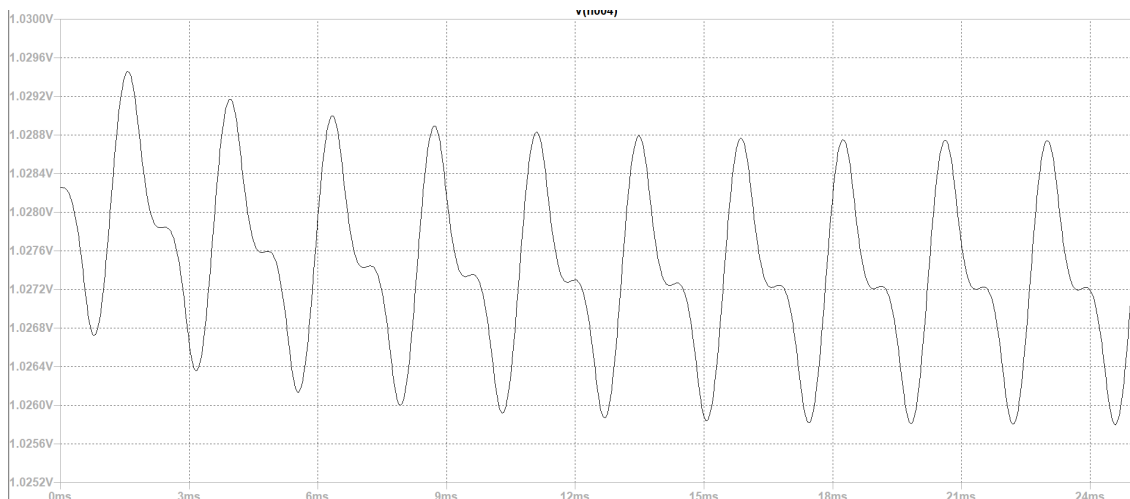
### 5.1.3 Měření proudu a napětí

Obě elektrické veličiny jsou měřeny na usměrněné části mařicího okruhu. Hodnota proudu je čidlem převedena na napěťový signál a hodnota napětí je přímo měřena z okruhu. Obě veličiny jsou pak vyhodnocovány interním 10 bitovým AD převodníkem mikropočítače Arduino.

Měření napětí probíhá pomocí integrovaného AD převodníku, který má rozsah 0 – 5 V. Aby bylo možné měřit hodnoty nad 30 V, je třeba použít napěťový dělič, který rozsah zmenší. Dále je vhodné zapojit filtr s dolní propustí, který ze signálu odstraní vysoké frekvence a ponechá v napětí jen mírné kolísání. Schéma s vyznačeným místem odběru signálu je na obrázku 25.



Obrázek 25: Schéma zapojení napěťového děliče s filtrem pro měření napětí.



Obrázek 26: Průběh měřeného napětí v čase při minimálních otáčkách.

Na obrázku 26 je výstup simulace softwaru LTspice XVII, který ukazuje časový průběh měřeného napětí. Jedná se o stav s minimálními otáčkami z tabulky 3.4, který je nejméně příznivý z hlediska kolísání napětí.

Integrovaný AD převodník má citlivost  $\Delta_{AD} = 4,9 \text{ mV}$ . Z grafu na obrázku 26 je patrné, že napětí kolísá přibližně o  $3 \text{ mV}$  a je tedy pod rozlišovací schopností převodníku.

Nejistota měření napětí plyne z měření rezistance odporů  $R_{1U} = 619,6 \text{ k}\Omega$  a  $R_{2U} = 102,4 \text{ k}\Omega$ . Jejich hodnoty určují vztah mezi reálným a měřeným napětím v napěťovém děliči. K měření rezistance byl použit multimetr *METEX M 4650 CR* [35]. Z jeho uváděné chyby vyplývají nejistoty měření napětí  $u_{R1U} = 1,23 \text{ k}\Omega$  a  $u_{R2U} = 0,45 \text{ k}\Omega$ .

Dále se na chybě podílí maximální rozlišení AD převodníku, které odpovídá  $\Delta_{AD} = 4,9 \text{ mV}$ . Převáděno na nejistotu podle [32] vyplývá  $u_{AD} = 2,8 \text{ mV}$ . Ve vztahu 34 představuje hodnota  $U_{AD}$  měřené napětí.  $U$  značí skutečné napětí a vztah mezi nimi je uveden v rovnici 35. Rovnice pro napěťový dělič se využije pro dosazení  $U$  za  $U_{AD}$  do vztahu 34, aby byla chyba vázána na hodnotu reálného napětí. To usnadní pozdější vyhodnocování chyb.

V neposlední řadě ovlivňuje přesnost měření také úbytek napětí na usměrňovacích diodách. K úbytku napětí dochází jak v usměrňovacím můstku výkonové části, tak i v usměrňovací diodě měřicí odbočky.

Velikost úbytku napětí usměrňovacích diod *MBR2545CT* velmi závisí na procházejícím proudu. Průběh závislosti je uveden v dokumentaci [36]. Nicméně k usměrnění, popřípadě transformaci napětí, by docházelo i při reálném využívání energie ze zdroje. Proto se zmařené napětí bude považovat za ztrátu, jejíž velikost bude možné odvodit z paralelního měření mechanickou cestou.

Velká rezistance a kapacita měřicí odbočky zaručuje minimální průtok proudu. Simulace v LTspice XVII ukazuje hodnoty v řádech  $\mu A$ . Podle *Shockleyovy rovnice* [37] vychází odpovídající úbytek napětí v setinách milivoltů a je možné jej zanedbat.

Na výsledné chybě se tedy budou podílet chyby v měření odporů a konečné rozlišení interního AD převodníku.

$$u_{rU} = \sqrt{\left(\frac{u_{R1U}}{R_{1U}}\right)^2 + \left(\frac{u_{R2U}}{R_{2U}}\right)^2 + \left(\frac{u_{AD}}{U_{AD}}\right)^2} \quad (34)$$

$$U_{AD} = U \frac{R_{2U}}{R_{1U} + R_{2U}} \quad (35)$$

$$u_{rU} = \sqrt{2,4 \cdot 10^{-4} + \frac{4 \cdot 10^{-4}}{U^2}} \quad (36)$$

Vztah pro stanovení hodnoty napětí z naměřeného čísla vychází z kroku  $\Delta_{AD}$  a poměru napětí na napěťovém děliči:

$$U = 3,45 \cdot 10^{-2} d_U [V] \quad (37)$$

Proud snímá proudová sonda *ACS712* [38], která má přímo udanou relativní nejistotu  $u_{rCS}$ . Citlivost sondy je rovna  $K_{CS} = 100 mV/A$ . Na nepřesnosti měření proudu se opět podílí rozlišení AD převodníku. Stejně jako v případě napětí je potřeba získat relativní chybu převodníku. Opět stejně jako u měření napětí je chyba převodníku dělena měřeným napětím. To se dá vypočítat ze znalosti citlivosti proudové sondy, jak je uvedeno v rovnici 38. Kombinovaná nejistota měření proudu sestává z chyby proudové sondy a nejistoty převodníku:

$$u_{rI} = \sqrt{(u_{rCS})^2 + \left(\frac{u_{AD}}{IK_{CS}}\right)^2} \quad (38)$$

$$u_{rI} = \sqrt{2,3 \cdot 10^{-4} + \frac{7,8 \cdot 10^{-6}}{I^2}} \quad (39)$$

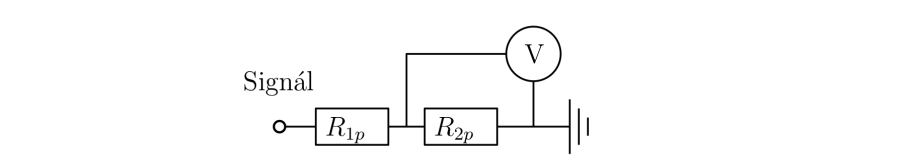
Hodnota proudu je podle dokumentace [38] lineárně závislá na měřeném napětí a proto platí vztah:

$$I = 4,9 \cdot 10^{-4} d_I [A] \quad (40)$$

### 5.1.4 Měření tlaku

Tlak je snímán ve válcové části dýzy ještě před zúžením, které zrychluje proud vody. Průměr potrubí v místě odběru činí  $D_{PS} = 67,8 \text{ mm}$ . Otvor pro odběr tlaku je orientován kolmo na směr proudění a je tak zajištěno snímání statického tlaku. Pro měření tlaku je použit senzor  $PXM309-3.5A10V$  s měřicím rozsahem  $0-3,5 \text{ bar}$  a lineárním napěťovým výstupem  $0-10 \text{ V}$ .

Jak bylo uvedeno, interní AD převodník má rozsah  $0-5 \text{ V}$  a proto je potřeba signál snížit na dělič napětí. Schéma zapojení čidla je podobné jako při měření napětí a je uvedeno na obrázku 27.



Obrázek 27: Dělič napětí pro měření statického tlaku.

Podobně jako u měření napětí se do přesnosti propisuje chyba měření odporů na multimetru a rozlišení převodníku. Hodnoty odporů jsou  $R_{1p} = 999,0 \Omega$  a  $R_{2p} = 999,9 \Omega$ , jejich odpovídají chyby podle manuálu [35] jsou  $u_{R1p} = 1,8 \Omega$  a  $u_{R2p} = 1,8 \Omega$ . Společně s již známou chybou rozlišení  $u_{AD} = 2,8 \text{ mV}$  lze napsat vztahy pro výpočet chyby měření tlaku 41, 43. Stejně jako proudová sonda má i tlakové čidlo uvedenou relativní nejistotu měření  $u_{rPS}$ .

$$u_{rp} = \sqrt{(u_{rPS})^2 + \left(\frac{u_{R1p}}{R_{1p}}\right)^2 + \left(\frac{u_{R2p}}{R_{2p}}\right)^2 + \left(\frac{u_{AD}}{U_{AD}}\right)^2} \quad (41)$$

$$U_{AD} = U \frac{R_{2p}}{R_{1p} + R_{2p}} \quad (42)$$

$$u_{rp} = \sqrt{1,1 \cdot 10^{-4} + \frac{3,8 \cdot 10^{-6}}{p^2}} \quad (43)$$

Hodnotu tlaku je nutné dosazovat v barech.

Měřené napětí je lineárně závislé na okamžitém tlaku. Po zavedení poměru z napěťového děliče se dá získat vztah pro měřený tlak:

$$p = 3,43 \cdot 10^{-3} d_p [\text{bar}] \quad (44)$$

## 5.2 Vyhodnocovací software

Data jsou po konci měření uložena do složky *Data* ve formátu csv. Jedná je o kompletní záznam z měření obsahující přechodové jevy a nežádoucí vnější vlivy.

Aby byla data použitelná, je potřeba je upravit a odstranit z nich odlehlé hodnoty. V jazyku Python byly proto vytvořeny programy *PKP\_DATA\_FILTER* a *PKP\_DATA\_ANALYSIS*. Pro oba kódy byla využita technologie umělé inteligence v podobě ChatGPT [27].

První program *PKP\_DATA\_FILTER* odstraní nepotřebné hodnoty a ponechá pouze ty označené během vzorkování. Výstupem programu jsou tři nové soubory exportované do složky *Data\_processed*.

První je soubor s příponou *\_data*. Ten obsahuje všechny vzorkované hodnoty a je nejdůležitějším svědectvím z měření.

Druhý soubor s příponou *\_mean* obsahuje průměrné hodnoty z každého vzorkování a dovoluje další práci na menším objemu dat.

Třetí soubor má příponu *\_stdev*. Data v souboru jsou doplňkem k průměrným hodnotám, protože obsahují jejich střední kvadratické odchylky a jsou důležité pro určení věrohodnosti výsledku. Mimo odchylek je v chybách zahrnuta i nejistota z měření. Pro stanovení nejistoty program implementuje vztahy odvozené v kapitole 5.1.

Druhý program *PKP\_DATA\_ANALYSIS* je určený k prokládání křivek a vykreslování grafů. Výstupem jsou grafy volitelných veličin a různé vizualizace. Důležitá schopnost programu je hledání křivky maximálního výkonu. Program prokládá body charakteristiky parabolami, jak bylo doporučeno v kapitole 3.1.2. Vrcholy parabol sledují křivku, rovněž parabolu, jejíž předpis se dá získat aproximací. Výsledná křivka je pak charakteristická pro danou turbínu, respektive pro její danou konfiguraci. Získaná křivka je nejvyšší abstrakcí měření hraje velkou roli při optimalizaci provozního stavu.

Získání této křivky umožňuje shrnout celou charakteristiku turbíny do tří koeficientů kvadratické rovnice. S vědomím, že paraboly výkonu mají procházet nulovým bodem a znalostí předpisu pro jejich vrcholy je možné celou charakteristiku matematicky zrekonstruovat.

Oba programy jsou opět součástí elektronické přílohy práce.

# Kapitola 6

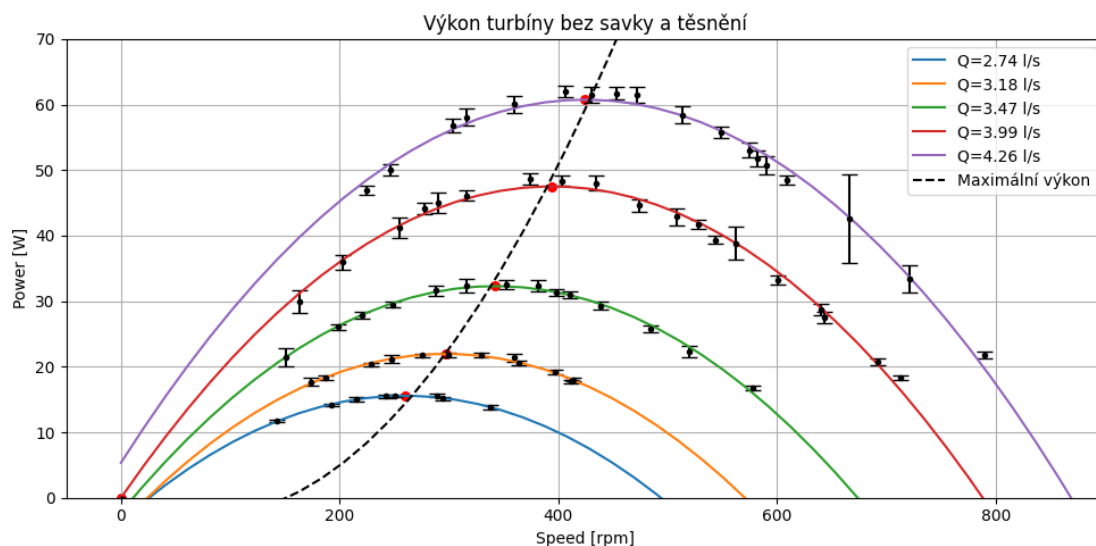
## Výsledky měření

Měření probíhalo na turbíně vyrobené v rámci bakalářské práce [16], jejíž hlavní parametry jsou uvedeny v tabulkách 3.1, 3.2.

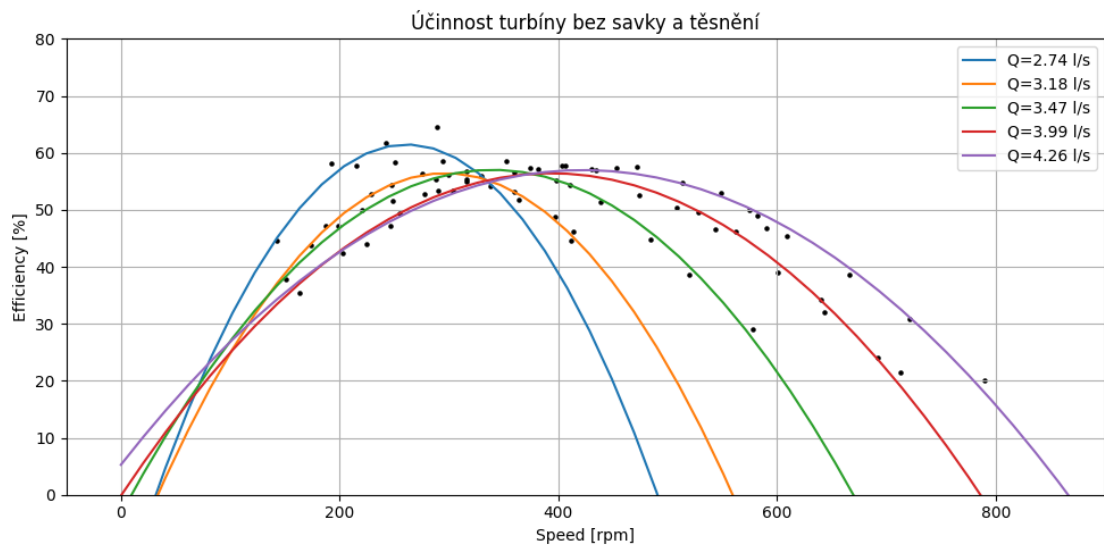
Byly ověřeny tři konfigurace turbíny, a to: s hřídelovými těsněními, bez těsnění se savkou a nakonec bez těsnění a bez savky. Cílem bylo vyhodnotit charakteristiku turbíny co se týče geometrie a ověřit funkčnost konstrukčního řešení. Měření se savkou a hřídelovým těsněním mělo ukázat, s jakým poklesem účinnosti je třeba počítat při jejich aplikaci.

Všechna naměřená data, včetně upravených a vyčištěných dat, jsou součástí elektronické přílohy. Data jsou v práci přehledně shrnuta formou grafů.

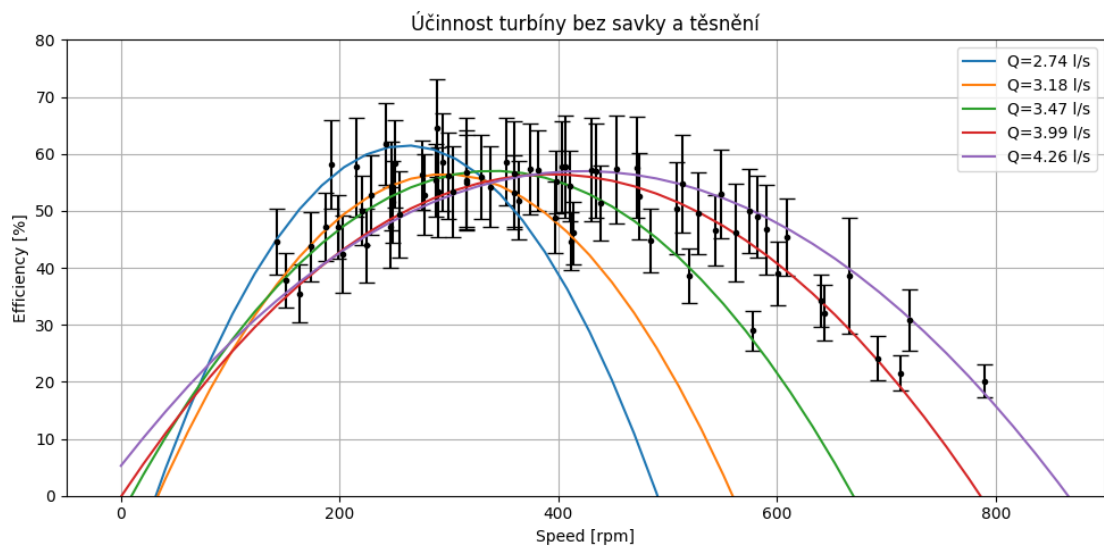
### 6.1 Měření bez savky a těsnění



Obrázek 28: Výkon turbíny bez savky a těsnění s chybovými úsečkami.

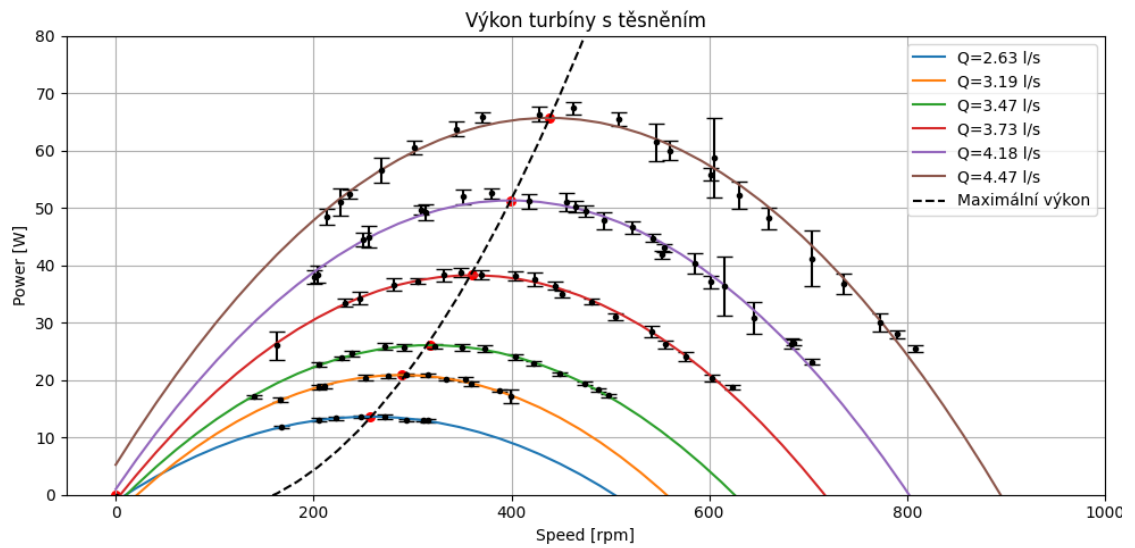


Obrázek 29: Proložené body účinnosti bez savky a těsnění.

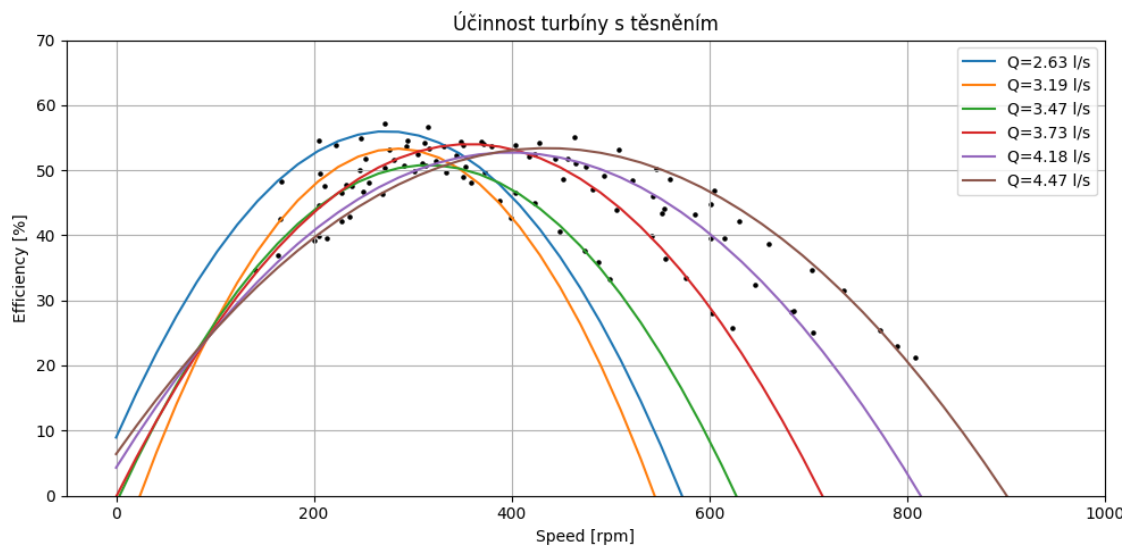


Obrázek 30: Body účinnosti turbíny bez savky a těsnění s chybovými úsečkami.

## 6.2 Měření s těsněním

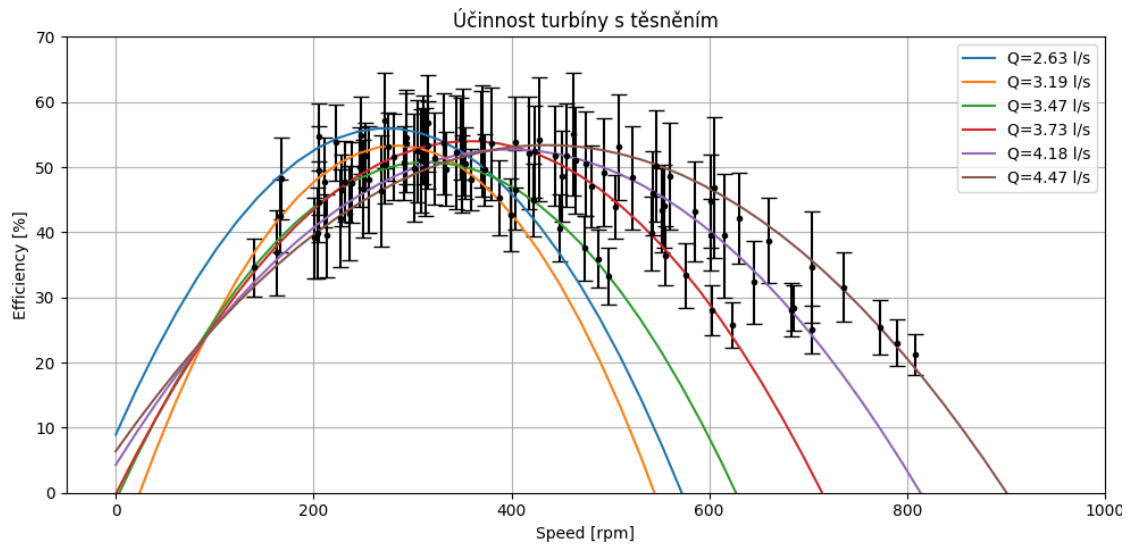


Obrázek 31: Výkon turbíny s těsněním a chybovými úsečkami.



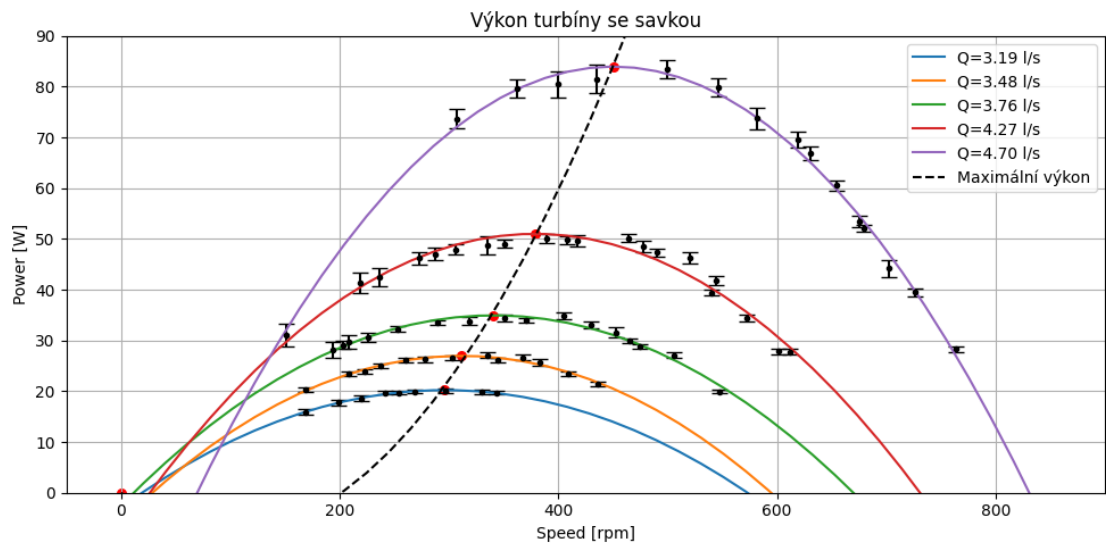
Obrázek 32: Proložené body účinnosti s těsněním.



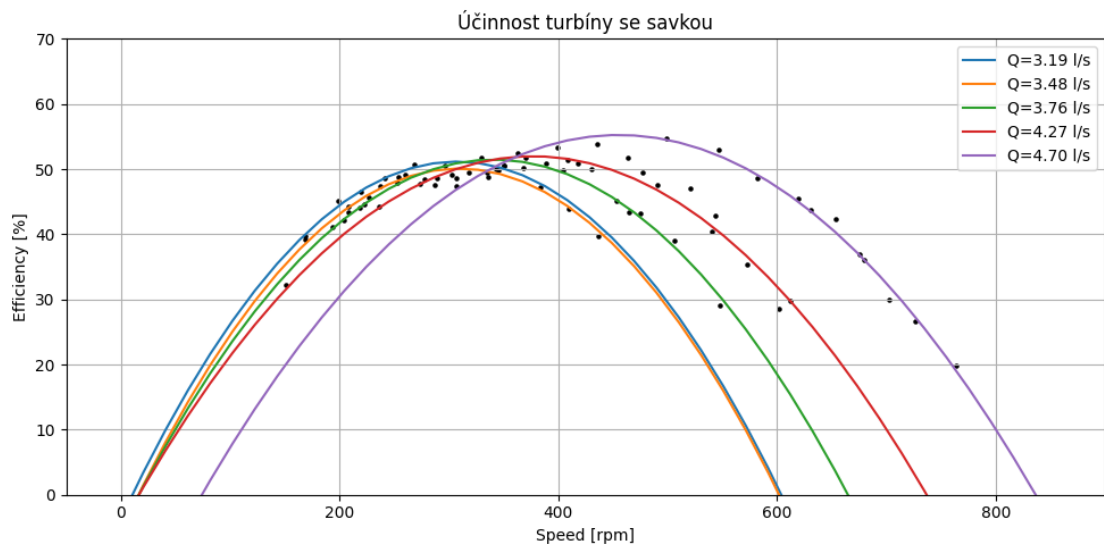


Obrázek 33: Body účinnosti turbíny s těsněním a chybovými úsečkami.

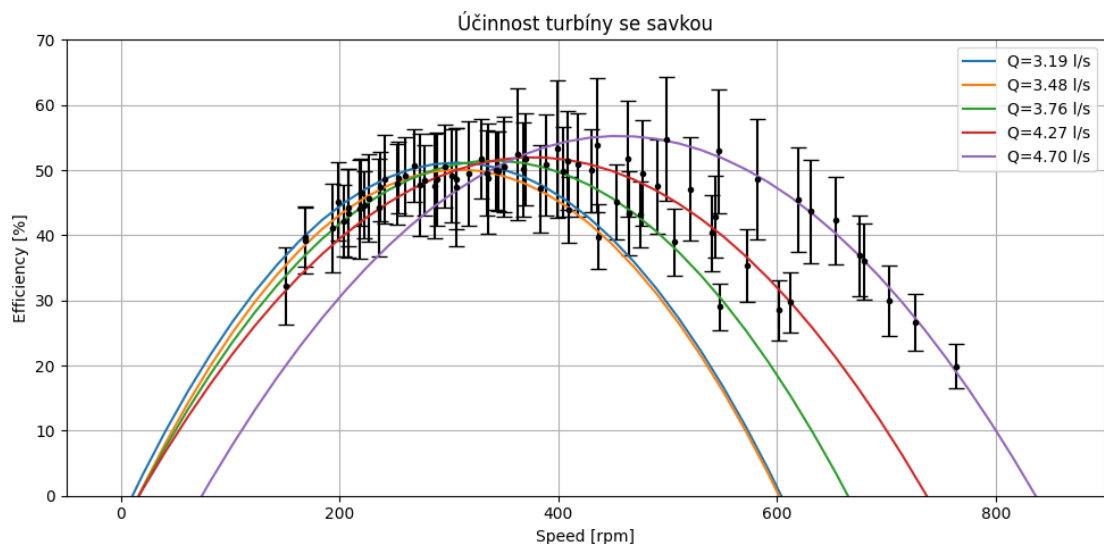
### 6.3 Měření se savkou



Obrázek 34: Výkon turbíny se savkou a chybovými úsečkami.



Obrázek 35: Proložené body účinnosti se savkou.



Obrázek 36: Body účinnosti turbíny se savkou a chybovými úsečkami.

## 6.4 Shrnutí výsledků

Naměřená data sledují trendy předpovězené v kapitole 3.1.2, což je vidět na prokládaných křivkách. Chybové úsečky obsahují jak střední kvadratickou odchylku měřeného vzorku, tak i nejistoty použitých měřících metod.

Nápadně vysoká nejistota je vidět v grafech účinnosti. Velikost odchylky má původ ve velkém rozptylu hodnot měřeného vzorku. Připomeneme-li si rovnice 27 a 26, můžeme vidět závislost  $\eta = f(Q^3)$ . Hodnota účinnosti je extrémně závislá na měření průtoku, a proto i malé výchyly tvoří velkou odezvu v podobě nejistoty měření účinnosti.

Oproti tomu měření výkonu vykazuje dobrou přesnost v řádu jednotek procent. Ojedinelé případy zvětšené nejistoty jsou důsledkem systému vyhodnocování otáček, který může mít dlouhou dobu odezvy a při nedostatečném ustálení vrací nesprávné hodnoty.

### 6.4.1 Účinnost

Všechny grafy ukazují, že maximální účinnost se v měřeném rozsahu příliš nemění. To odpovídá výsledkům teoretického rozboru proudění. Průměrné hodnoty dosažených účinností jsou shrnuty v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1: Maximální účinnosti různých konfigurací turbíny.

Popis	Hodnota
Účinnost bez savky a bez těsnění	57,7 %
Účinnost s těsněním	53,4 %
Účinnost se savkou	52,0 %

### 6.4.2 Výkon

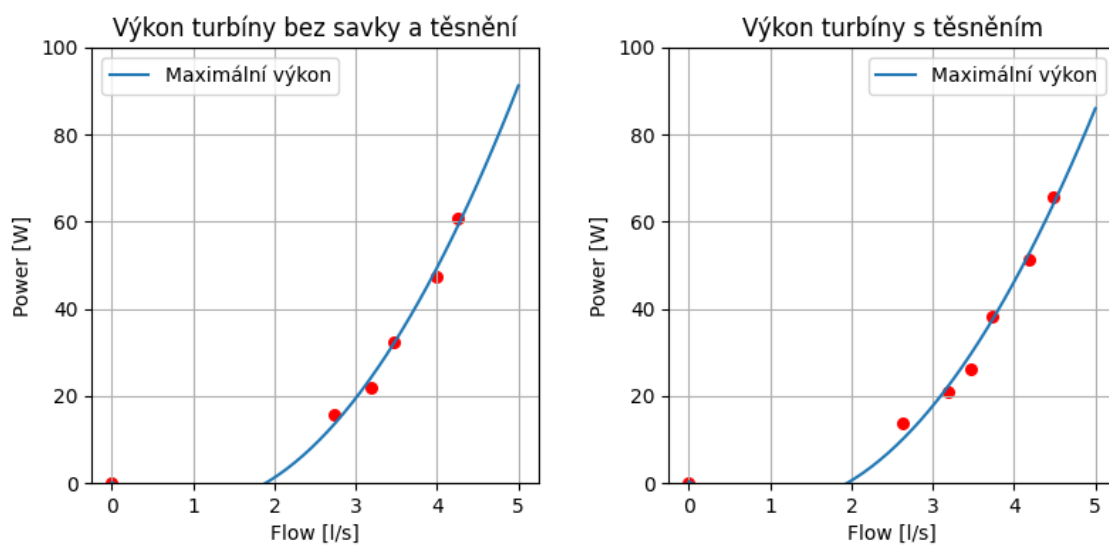
Výkon turbíny v různých provozních stavech je patrný na výše uvedených grafech. Z hlediska aplikace turbíny a zobecnění dat jsou důležité křivky maximálního výkonu. Vztah 21 ukazuje, že maximální výkon je kvadraticky závislý na průtoku vyjádřeným v rovnici rychlostí  $c_1$ . Funkční závislost maximálního výkonu na průtoku  $P_{max} = aQ^2 + bQ + c$  je zásadní pro řízení turbíny. Její průběh je uveden na grafech 37.

Další závislost platí podle rovnice 16 mezi maximálním výkonem a optimálními otáčkami  $P_{max} = kn^2 + ln + m$ . Tato závislost je aproximována a vynesena čárkovanou křivkou do grafů. Pro každou konfiguraci jsou z aproximací známé parametry  $a, b, c$  a  $k, l, m$ . Tímto je zcela popsáno chování turbíny v prostoru průtoku a otáček. Řízení turbíny na maximální výkon v proměnlivém průtoku znamená v podstatě řešení rovnice 45 pro neznámou  $n$ .

$$kn^2 + ln + m = aQ^2 + bQ + c \quad (45)$$

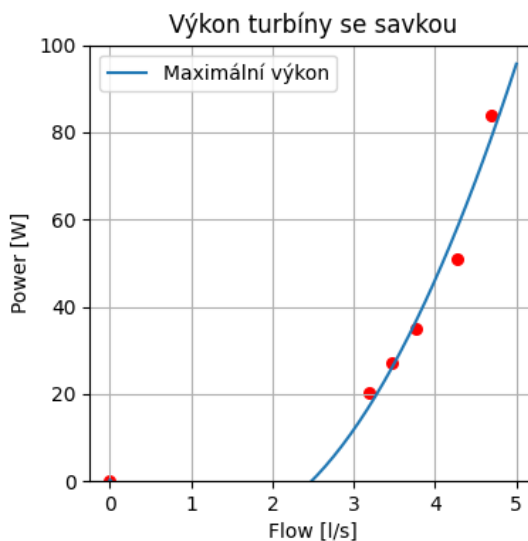
Koeficienty získané z datové analýzy jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Grafy 37 ukazují schopnost jednotlivých konfigurací přeměňovat energii vody na mechanickou práci. Mimo jiné je vidět i stagnační průtok, při kterém již není turbína schopna překonat vnitřní odpory a zastaví se.



(a) Bez savky a těsnění.

(b) S těsněním.



(c) Se savkou.

Obrázek 37: Grafy maximálního výkonu v závislosti na průtoku.

Tabulka 6.2: Koeficienty maximálního výkonu pro různé konfigurace turbíny.

Provoz	$k \cdot 10^{-4}$	$l \cdot 10^{-2}$	$m \cdot 10^{-2}$	a	b	c
Bez savky a bez těsnění	5,13	-7,87	12,5	5,89	-11,2	0,121
S těsněním	5,38	-8,67	5,70	5,67	-11,2	0,323
Se savkou	7,51	-15,1	-1,87	7,62	-19,0	0,247

# Závěr

Tato práce měla za cíl objektivní zhodnocení vodní pico-turbíny vyráběné 3D tiskem. Jednalo se o turbínu typu Bánki s průměrem oběžného kola  $150\text{ mm}$ , nominálními otáčkami  $600\text{ rpm}$  a nominálním výkonem  $200\text{ W}$ . hlavní části turbíny- oběžné kolo a tryska byly vyrobeny 3D tiskem metodou MJF. Skříň byla svařena z korozivzdorných výpalků a hřídel obrobena z duralové kulatiny.

První částí byla rešerše, která měla jednak nalézt podobné experimenty provedené v minulosti a z nich získat data pro porovnání s vlastní turbínou. A jednak provést studii aplikačního potenciálu.

Výsledkem rešeršní části zaměřené na akademické práce je vytipovaných osm prací, které splňují požadovaná kritéria a jsou vhodná k porovnání. V tabulce 6.3 jsou vyjmenovány některé z nich.

Tabulka 6.3: Shrnutí parametrů vytipovaných prací.

Projekt	Účinnost [%]	Výkon [W]
Archimédův šroub (3D)	71	123
Axilání turbína (3D)	45	8,67
Axiální protiběžná turbína	64,7	100
Upravená Turgo turbína	91	150
Peltonova turbína	36,4	253

Druhá část rešeršní práce vyšetřovala aplikační potenciál pro pico-turbíny jak z hlediska dostupného hydroenergetického potenciálu, tak z hlediska ekonomického. Co se hydroenergetického potenciálu ČR týče, bylo zjištěno, že nevyužitý potenciál je především ve výkonech pod  $10\text{ MW}$ . Konkrétně se jedná o potenciální výstavbu přibližně  $157\text{ MW}$  nových zdrojů na spádech z  $90\%$  menších než  $5\text{ m}$ .

Výsledkem ekonomicky zaměřené rešerše je přibližná kalkulace ceny turbíny shrnutá přehledně v tabulce 6.4.

Výsledky měření jsou dopodrobna popsány v kapitole 6 a proto má smysl zde uvést jen hlavní dosažené výkony. Měření proběhlo pro tři konfigurace turbíny jak je uvedeno v tabulce 6.5.

Z tabulky je vidět že konfigurace, u kterých by se daly předpokládat vyšší ztráty, paradoxně dosahují vyšších výkonů. Je to z toho důvodu, že velké pasivní odpory

Tabulka 6.4: Shrnutí parametrů vytipovaných prací.

Položka	Hodnota
Stávající turbína	15720 Kč
Stávající turbína s instalací	28500 Kč
Instalovaný výkon	57000 Kč / <i>kWe</i>

Tabulka 6.5: Shrnutí výsledků měření turbíny.

Popis	Účinnost	Výkon
Provoz bez savky a bez těsnění	57,7 %	61 W
Provoz s těsněním	53,4 %	66 W
Provoz se savkou	52,0 %	84 W

měly tlumící funkci v soustavě dynamometr-turbína. Sestava měla tendenci kmitat a při výkonech nad 60 W docházelo k přeskokování řemenu.

Pozornému čtenáři jistě neunikla úplná absence měření s elektrickou zátěží. Je to proto, že při prvním pokusu o zapojení generátoru došlo, ze zatím neznámé příčiny, k zahoření jednoho z MOSFETů. Mařicí okruh je proto vy zkratu a není možné ho používat.

Celá měřicí aparatura a softwarové vybavení je navrženo tak, aby jej mohl bez větších problémů používat každý. Idea je taková, že se měřicí trať bude dát využívat pro další experimenty s vodními turbínami.

# Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$E$	$J/kg$	Měrná energie
$g$	$m/s^2$	Tíhové zrychlení
$h$	$m$	Převýšení
$p$	$bar$	Tlak
$\rho$	$kg/m^3$	Hustota vody
$c$	$m/s$	Absolutní rychlost
$u$	$m/s$	Unášivá rychlost
$w$	$m/s$	Relativní rychlost
$\xi$	$m/s$	Ztrátová rychlost
$c'$	$m/s$	Mimooptimální absolutní rychlost
$w'$	$m/s$	Mimooptimální relativní rychlost
$\beta$	$^\circ$	Úhel mezi unášivou a relativní rychlostí
$\alpha$	$^\circ$	Úhel mezi unášivou a absolutní rychlostí
$\gamma$	$^\circ$	Úhel mezi absolutní a relativní rychlostí
$\beta'$	$^\circ$	Doplňkový úhel beta
$\eta_t$	%	Účinnost turbíny
$\eta_{max}$	%	Účinnost turbíny v optimální režimu
$W_t$	$J/kg$	Měrná práce turbíny
$W_{max}$	$J/kg$	Měrná práce turbíny v optimálním režimu
$K_1$	1	Lineární koeficient funkce ideální měrné práce
$K_2$	1	Kvadratický koeficient funkce ideální měrné práce
$H_z$	$m$	Zadaný spád
$Q_z$	$l/s$	Zadaný průtok

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$D$	$mm$	Průměr oběžného kola
$P_n$	$W$	Nominální výkon
$n_n$	$rpm$	Nominální otáčky
$l$	$mm$	Šířka lopatky
$r_l$	$mm$	Poloměr zakřivení lopatky
$N_l$	1	Počet lopatek
$A_D$	$m^2$	Průřez dýzy
$Q_{trat,max}$	$l/s$	Maximální průtok tratě
$H_{trat,n}$	$m$	Maximální tratě
$p_{trat,max}$	$l/s$	Nominální spád tratě
$\tau_{trat,max}$	$min$	Maximální nepřetržitá doba provozu tratě
$U_{max}$	$V$	Maximální napětí na elektrické zátěži
$I_{max}$	$A$	Maximální proud na elektrické zátěži
$P_{el,max}$	$W$	Maximální mařený výkon na elektrické zátěži.
$n_{dyn,min}$	$rpm$	Minimální otáčky dynamometru
$n_{dyn,max}$	$rpm$	Maximální otáčky dynamometru
$M$	$Nm$	Krouticí moment
$n$	$rpm$	Otáčky
$Q$	$l/s$	Objemový průtok
$U$	$V$	Napětí
$I$	$A$	Proud
$U_{ef}$	$V$	Efektivní hodnota napětí
$I_{ef}$	$A$	Efektivní hodnota proudu
$P_{in}$	$W$	Teoretická výkon vstupující vody
$A_{PS}$	$m^2$	Průřez potrubí v místě odběru tlaku
$\tau_{serial}$	$ms$	Doba měření
$u_{rQ}$	1	Relativní nejistota měření průtoku
$u_{rM}$	1	Relativní nejistota měření krouticího momentu
$u_{rn}$	1	Relativní nejistota měření otáček
$u_{rp}$	1	Relativní nejistota měření tlaku
$u_{rU}$	1	Relativní nejistota měření napětí
$u_{rI}$	1	Relativní nejistota měření proudu
$u_{rCS}$	1	Relativní nejistota čidla proudu
$u_{rPS}$	1	Relativní nejistota čidla tlaku



<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$d_Q$	1	Výstup AD převodníku průtoku
$d_M$	1	Výstup AD převodníku krouticího momentu
$d_n$	1	Výstup AD převodníku otáček
$d_p$	1	Výstup AD převodníku tlaku
$d_U$	1	Výstup AD převodníku napětí
$d_I$	1	Výstup AD převodníku proudu
$r$	$m$	Délka ramene dynamometru
$u_{AD}$	1	Chyba měření AD převodníku
$u_r$	1	Chyba měření posuvného měřítka
$u_{LC}$	1	Chyba měření deformačního členu
$u_{R1U}$	1	Chyba měření dělicího odporu napětí
$u_{R2U}$	1	Chyba měření dělicího odporu napětí
$u_{R1p}$	1	Chyba měření dělicího odporu tlaku
$u_{R2p}$	1	Chyba měření dělicího odporu tlaku
$z$	1	Převodový poměr
$\Delta_{AD}$	$mV$	Rozlišení AD převodníku
$U_{AD}$	$V$	Napětí měřené Arduinem
$R_{1U}$	$\Omega$	Dělicí odpor napětí
$R_{2U}$	$\Omega$	Dělicí odpor napětí
$R_{1p}$	$\Omega$	Dělicí odpor tlaku
$R_{2p}$	$\Omega$	Dělicí odpor tlaku
$K_{CS}$	$mV/A$	Citlivost proudové sondy
$D_{PS}$	$mm$	Průměr potrubí v místě odběru tlaku
$a, b, c$	1	Koeficienty kvadratické rovnice výkon-průtok
$k, l, m$	1	Koeficienty kvadratické rovnice výkon-otáčky

<b>Index</b>	<b>Význam</b>
$X_0$	Před vstupem do turbíny
$X_1$	Na prvním vstupu lopatek
$X_2$	Na prvním výstupu lopatek
$X_3$	Na druhém vstupu lopatek
$X_4$	Na druhém výstupu lopatek
$X_u$	V meridiálním směru

# Seznam obrázků

1	Obrázky 3D tištěných turbín z citovaných prací. . . . .	13
2	Obrázky pico-turbín z citovaných prací. . . . .	15
3	Ukázka materiálů experimentální turbíny. . . . .	18
4	Poprvé složená turbína včetně trysky. . . . .	22
5	Rozložené součásti turbíny. . . . .	22
6	Boční řez Bánkiho turbínou. . . . .	23
7	Rychlostní trojúhelníky odpovídající bodům 1, 2, 3, 4 z obrázku 6. . .	24
8	Vstupní rychlostní trojúhelník při mimo optimálním provozním stavu.	25
9	Průběh měrné práce turbíny v závislosti na otáčkách. . . . .	28
10	Průběh účinnosti turbíny v závislosti na otáčkách. . . . .	28
11	Schéma měřicí trati. . . . .	29
12	Charakteristika čerpadla Winner 200 [25]. . . . .	29
13	Elektrické schéma zapojení čerpadla a ovládání. . . . .	30
14	Sestavený celek turbíny s dynamometrem. . . . .	31
15	Těleso dynamometru na kyvných podporách před montáží. . . . .	31
16	Schéma elektrického obvodu maření energie. . . . .	32
17	Chladič s krabičkou měřicí elektroniky. . . . .	33
18	Chladič s krabičkou měřicí elektroniky. . . . .	33
19	Schéma zapojení a instalace čidel na trati. . . . .	36
20	Schéma zapojení a instalace čidel na trati. . . . .	36
21	Data naměřená při kalibraci průtokoměru. . . . .	39
22	Relativní chyba měření průtoku. . . . .	39
23	Data naměřená při kalibraci deformačního členu. . . . .	40

24	Umístění ocelových značek na disku brzdy. . . . .	41
25	Schéma zapojení napěťového děliče s filtrem pro měření napětí. . . . .	42
26	Průběh měřeného napětí v čase při minimálních otáčkách. . . . .	42
27	Dělič napětí pro měření statického tlaku. . . . .	44
28	Výkon turbíny bez savky a těsnění s chybovými úsečkami. . . . .	46
29	Proložené body účinnosti bez savky a těsnění. . . . .	47
30	Body účinnosti turbíny bez savky a těsnění s chybovými úsečkami. . . . .	47
31	Výkon turbíny s těsněním a chybovými úsečkami. . . . .	48
32	Proložené body účinnosti s těsněním. . . . .	48
33	Body účinnosti turbíny s těsněním a chybovými úsečkami. . . . .	49
34	Výkon turbíny se savkou a chybovými úsečkami. . . . .	49
35	Proložené body účinnosti se savkou. . . . .	50
36	Body účinnosti turbíny se savkou a chybovými úsečkami. . . . .	50
37	Grafy maximálního výkonu v závislosti na průtoku. . . . .	52

# Seznam tabulek

1.1	Parametry dosahované v laboratorním provozu 3D tištěných turbín. . .	12
1.2	Parametry dosahované v laboratorním provozu pico-turbín různých druhů. . . . .	14
2.1	Kalkulace ceny komponent turbíny. . . . .	19
3.1	Hlavní parametry turbíny. . . . .	27
3.2	Geometrie experimentální turbíny. . . . .	27
3.3	Parametry měřicí tratě . . . . .	30
3.4	Parametry dynamometru. . . . .	33
4.1	Přehled použitých čidel. . . . .	35
6.1	Maximální účinnosti různých konfigurací turbíny. . . . .	51
6.2	Koeficienty maximálního výkonu pro různé konfigurace turbíny. . . .	52
6.3	Shrnutí parametrů vytipovaných prací. . . . .	53
6.4	Shrnutí parametrů vytipovaných prací. . . . .	54
6.5	Shrnutí výsledků měření turbíny. . . . .	54

# Literatura

- [1] *Seznam vodních elektráren v ČR*. Prodej vodní elektrárny. Dostupné z: <https://www.prodej-vodni-elektrarny.cz/seznam-vodnich-elektraren-v-cr> (cit. 31. 05. 2023).
- [2] *Turbine SETUR*. VORTEX HYDROKINETICS. Dostupné z: <https://www.vortexhydro.com/> (cit. 31. 05. 2023).
- [3] T Kamimura, H Itoh a K Sugiura. “Development turbine blade for ultramicro hydro power generation by 3D printer system”. V: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 93.1 (2017), s. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/93/1/012019. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/93/1/012019>.
- [4] Kyung Tae Lee et al. “Design and 3D printing of controllable-pitch Archimedean screw for pico-hydropower generation”. V: *Journal of Mechanical Science and Technology* 29.11 (2015), s. 4851–4857. ISSN: 1976-3824. DOI: 10.1007/s12206-015-1032-y. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1032-y>.
- [5] Monika Kiesel. “Konzeption, Auslegung und Konstruktion einer Mikro-Propellerwasserturbine”. Bachelor’s thesis. Ostbayerische Technische Hochschule, 2015.
- [6] Ding Nan et al. “Study on performance of contra-rotating small hydro-turbine with thinner blade and longer front hub”. V: *Renewable Energy* 117 (2018), s. 184–192. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.046>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117310091>.
- [7] CSc. Doc. Ing. Jan Melichar. *Malé vodní turbíny*. Nakladatelství ČVUT, 1998. ISBN: 80-01-01808-0.
- [8] S.J. Williamson, B.H. Stark a J.D. Booker. “Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine”. V: *Applied Energy* 102 (2013). Special Issue on Advances in sustainable biofuel production and use - XIX International Symposium on Alcohol Fuels - ISAF, s. 1114–1126. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.029>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912004746>.
- [9] Kyle Gaiser et al. “An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response surface methodology”. V: *Renewable Energy* 85 (2016), s. 406–418. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.049>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300720>.
- [10] Hamza Ahmad Raza, Sara Sultan a Kendra V. Sharp. “Determining turbine and generator efficiency of a Pico hydro system at different flow rate”. V: (2016). Dostupné z: [https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PA00VPJ2.pdf](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00VPJ2.pdf).
- [11] C.H. Achebe, O.C. Okafor a E.N. Obika. “Design and implementation of a crossflow turbine for Pico hydropower electricity generation”. V: *Heliyon* 6.7 (2020), e04523. ISSN: 2405-8440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04523>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020313670>.

- [12] Zbyněk Svoboda. “Nevyužitý hydropotenciál v ČR a energetické využití vodních zdymadel”. Master’s thesis. České vysoké učení technické v Praze, 2020.
- [13] *Obnovitelné zdroje energie v roce 2021*. ministerstvo průmyslu a obchodu. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2022/11/Obnovitelne-zdroje-energie-2021.pdf> (cit. 01.06.2023).
- [14] *obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*. ČEZ. Dostupné z: [https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/obnovitelne\\_zdroje\\_v\\_cr.pdf](https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/obnovitelne_zdroje_v_cr.pdf) (cit. 01.06.2023).
- [15] *How to Use Multi Jet Fusion for Functional 3D-Printed Parts*. Protolabs. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/how-to-use-multi-jet-fusion-for-functional-3d-printed-parts/> (cit. 02.06.2023).
- [16] Vilém Hron. “Návrh vodní mikroturbíny vyráběné 3D tiskem”. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2021.
- [17] *Ceny 3D tisku*. sharplayers. Dostupné z: <https://sharplayers.cz/ceny/ceny-3d-tisku/> (cit. 02.06.2023).
- [18] *On-line kalkulátor výpalků*. Opetech. Dostupné z: <https://vypalky.opetech.cz/> (cit. 02.06.2023).
- [19] *MIG a TIG SVAŘOVÁNÍ*. A-Z Kovo. Dostupné z: <https://www.azkovo.eu/sluzby/svarovani-mig-a-tig> (cit. 02.06.2023).
- [20] *CENÍK*. CNC Studio. Dostupné z: <https://www.cncstudio.cz/cenik> (cit. 02.06.2023).
- [21] *CENÍK*. Montáž bazénů. Dostupné z: <https://montazbazenu.cz/cenik/> (cit. 02.06.2023).
- [22] *Cena fotovoltaiky pro rodinný dům*. evolty. Dostupné z: <https://evolty.cz/fve/cena-fotovoltaiky/> (cit. 02.06.2023).
- [23] *Arduino Uno Rev3*. Arduino. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (cit. 11.05.2023).
- [24] CSc. Ing. Josef Bednář. *Malé vodní elektrárny 2- Turbíny*. 1. vyd. SNTL, 1989.
- [25] *Winner, Bomba autoaspirante para piscina*. Saci pumps. Barcelona, Spain, 2023. Dostupné z: [https://www.sacipumps.com/uploads/productos2/winner\\_info.pdf](https://www.sacipumps.com/uploads/productos2/winner_info.pdf) (cit. 09.05.2023).
- [26] Professor Dr.-Ing. Peter Stephan. *VDI Heat Atlas*. Springer, 2010. ISBN: 978-3-540-77876-9.
- [27] *Introducing ChatGPT*. OpenAI. Dostupné z: <https://openai.com/blog/chatgpt> (cit. 30.05.2023).
- [28] *Arduino Software*. ARDUINO. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/software> (cit. 30.05.2023).
- [29] *Měrné přelivy*. Fiedler, elektronika pro ekologii. Dostupné z: <https://www.fiedler-company/cs/produkty/prutokomery-pro-otevrene-kanaly/merne-prelivy> (cit. 11.05.2023).
- [30] *GP2Y0A21YK0F*. SHARP. Dostupné z: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf) (cit. 13.05.2023).
- [31] *24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*. AVIA Semiconductor. Dostupné z: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf) (cit. 13.05.2023).
- [32] Mgr. Zdeněk Kohout. *Laboratorní cvičení z fyziky*. Nakladatelství ČVUT, 2003. ISBN: 80-01-02472-5.
- [33] *LJ12A3-4-Z/AX*. Yueqing Hengwei Electronics. Dostupné z: [https://img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/11/775-195/dsh.775-195.1.pdf](https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/11/775-195/dsh.775-195.1.pdf) (cit. 21.05.2023).
- [34] *Language Reference*. Arduino. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en/> (cit. 11.05.2023).
- [35] *Operating Manual M 4650 CR*. METEX.

- [36] *Schottky Rectifier, 2 x 15 A*. Vishay. Dostupné z: [https://img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/3/223-046/dsh.223-046.2.pdf](https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/3/223-046/dsh.223-046.2.pdf) (cit. 21. 05. 2023).
- [37] Willy McAllister. *Diode equation*. Spinning Numbers. Dostupné z: <https://spinningnumbers.org/a/diode-equation.html> (cit. 21. 05. 2023).
- [38] *Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Allegro. Dostupné z: [https://dratek.cz/docs/produkty/1/1262/acs712\\_datasheet.pdf](https://dratek.cz/docs/produkty/1/1262/acs712_datasheet.pdf) (cit. 12. 05. 2023).

## Příloha A

Vzhled uživatelského rozhraní a  
záhlaví výstupního souboru



