

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh laboratorních úloh měření vodních motorů  
s využitím 3D tisku**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Markéta KŘÍŽOVÁ**  
Osobní číslo: **E18N0018P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Téma práce: **Návrh laboratorních úloh měření vodních motorů s využitím 3D tisku**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

#### Zásady pro vypracování

1. Vysvětlete princip a funkci základních typů vodních motorů.
2. Vylepšete stávající demonstrační modely vodních motorů s využitím 3D tiskárny.
3. Navrhněte laboratorní úlohu s využitím vytvořených modelů vodních motorů.
4. Provedte vzorové měření laboratorní úlohy.



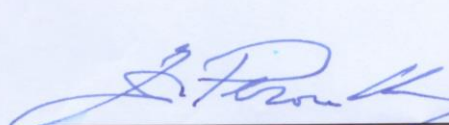
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

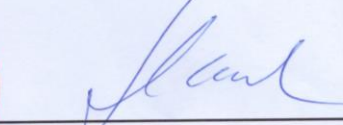
1. Melichar, Vojtek, Bláha: Malé vodní turbíny – konstrukce a provoz, ČVUT, 1998.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
**Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návržení laboratorních úloh vodních motorů s využitím 3D tisku. V první části se práce věnuje popisu vodní energetiky. Další kapitola popisuje teorii vodních motorů. V této kapitole jsou popsány základní principy a konstrukce. Třetí část ukazuje úpravu modelů vodních motorů s využitím 3D tisku. V poslední části jsou představeny měřicí úlohy.

## **Klíčová slova**

Vodní kolo, vodní turbína, vodní motory, 3D tisk, energetika.

**Abstract**

The master thesis is focused on design of laboratory tasks of water engines with usage 3D printing. In the first part is thesis devoted to description of water energetics. The next chapter describes theory of water engines. In this chapter basic principles and construction problems are described. The third part shows adjustments of water engines with usage of 3D printing. In the last part laboratory tasks are introduced.

**Key words**

Water wheel, water turbine, water engine, 3D print, energetics.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 17.6.2020

Markéta Křížová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Milanovi Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 VODNÍ ENERGETIKA</b> .....	<b>11</b>
1.1 ENERGIE VODY .....	12
1.2 VODNÍ ELEKTRÁRNY .....	12
<b>2 VODNÍ MOTORY</b> .....	<b>14</b>
2.1 VODNÍ KOLA .....	14
2.1.1 Dělení vodních kol.....	15
2.1.2 Kola lopatková.....	15
2.1.3 Korečková vodní kola .....	16
2.1.4 Jednotlivé druhy vodních kol.....	18
2.2 VODNÍ TURBÍNY .....	25
2.2.1 Výkon a energetická bilance turbin .....	27
2.2.2 Peltonova turbína .....	29
2.2.3 Kaplanova turbína.....	31
2.2.4 Dériazova turbína.....	34
2.2.5 Francisova turbína .....	35
2.2.6 Bánkiho turbína .....	36
2.2.7 TURGO turbína .....	38
2.2.8 Součásti turbin.....	39
<b>3 ÚPRAVA STÁVAJÍCÍCH MODELŮ</b> .....	<b>45</b>
3.1 MODEL VODNÍHO KOLA.....	45
3.1.1 Možné úpravy vodního kola.....	46
3.1.2 Experimentální sestavení.....	52
3.2 MODEL PELTONOVY TURBÍNY.....	53
3.2.1 Možné úpravy Peltonovy turbíny.....	54
3.2.2 Experimentální sestavení.....	58
3.3 MODEL FRANCISOVY TURBÍNY .....	60
3.3.1 Možné úpravy Francisovy turbíny .....	62
<b>4 NÁVRH LABORATORNÍCH ÚLOH</b> .....	<b>71</b>
4.1 VODNÍ KOLO .....	71
4.1.1 Pracovní bod vodního kola.....	71
4.1.2 Výpočet parametrů vodního toku.....	71
4.1.3 Měření výkonu .....	73
4.2 PELTONOVA TURBÍNA.....	74
4.2.1 Měření parametrů vodního toku .....	74
4.2.2 Měření naprázdno a měření výkonu .....	76
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>78</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>80</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>81</b>
<b>PŘÍLOHA A</b> .....	<b>82</b>
<b>PŘÍLOHA B</b> .....	<b>83</b>



<b>PŘÍLOHA C</b> .....	<b>87</b>
<b>PŘÍLOHA D</b> .....	<b>94</b>
<b>PŘÍLOHA E</b> .....	<b>98</b>

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na vytvoření měřících úloh s využitím modelů vodních motorů, které jsou sestrojeny pomocí 3D tisku.

První, úvodní kapitola, se stručně věnuje popisu vodní energetiky, dále je zde uvedena charakteristika vodní energie a následně jsou popsány základní principy vodních elektráren.

Předmětem druhé kapitoly jsou vodní motory, které se dělí na dva základní typy, a sice vodní kola a vodní turbíny. Je rozebrán princip vodních kol a jsou představení jednotliví významní zástupci včetně jejich matematických popisů. U vodních turbín je uveden princip a konstrukční náležitosti jednotlivých typů, dále jsou popsány důležité strojní součásti turbín.

Kapitola třetí se věnuje úpravě stávajících modelů. V první části této kapitoly jsou rozebírány možné úpravy vodního kola a dále experimentální sestavení pro testování funkce. Mezi řešené úpravy patří návrh uchycení, dále návrh krycí krabice a připojení ke generátoru. Další část pokrývá obdobné úpravy Peltonovy turbíny včetně experimentálního sestavení. V poslední části třetí kapitoly jsou navrženy úpravy Francisovy turbíny, jedná se zejména o úpravu geometrie oběžného kola a přepracování regulátoru.

Závěrečná kapitola rozebírá návrh a provedení laboratorních úloh. V rámci úloh jsou počítány parametry vodního toku na základě měření a také jsou určovány elektrické parametry soustavy vodního kola nebo turbíny s generátorem. Je provedeno vzorové měření a vypracovány laboratorní protokoly.

## Seznam symbolů a zkratk

a,b .....	Rozměry korečků, lopatek
D .....	Průměr
E.....	Měrná energie
e .....	Stupeň plnění
g .....	Gravitační konstanta
H, h .....	Spád
L, i.....	Počet lopatek
m.....	Hmotnost
n .....	Otáčky
o .....	Obvod kola
P.....	Výkon
Q.....	Průtok
r.....	Poloměr
r.....	Redtenbacherův koeficient
t.....	Čas
t.....	Rozteč lopatek
u .....	Obvodová rychlost
V .....	Objem
v,c .....	Rychlost
x,y .....	Dráha
$\mu$ .....	Průtokový koeficient
$\eta$ .....	Účinnost
$\rho$ .....	Hustota
$\varphi$ .....	Výtokový součinitel
$\Psi$ .....	Součinitel plnění korečků

# 1 Vodní energetika

Využití vodní energie je jedním z hlavních směrů výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Vodní elektrárny nepotřebují ke svému provozu fosilní nebo jaderné palivo a neprobíhají v nich vysokoteplotní procesy, jejich provoz je relativně levný [1]. Vybavení vodní elektrárny je jednoduché na údržbu a provoz, díky tomu není nutné dělat časté odstávky [1]. Vodní energie je jednoduše regulovatelná, a tak dobře pokrývá proměnnou zátěž [1]. Vodní elektrárny lze také snadno automatizovat, což zvyšuje flexibilitu a snižuje náklady [1]. Některé vodní elektrárny vybudované před sto lety dodnes pracují spolehlivě [1]. Dobře navržené vodní dílo může poskytovat více výhod, než jen výrobu elektrické energie. Mezi tyto výhody patří například regulace toku a omezení záplav, zlepšení kvality vody [1].

Vodní energie hraje významnou roli ve světovém energetickém mixu výroby [1]. Vodní elektrárny mají vysoké počáteční náklady na výstavbu, ale jejich provoz je levný a cenově stálý, například oproti fosilním elektrárnám, kde se mění celé palivo [1]. Výstavba velké elektrárny je značný zásah do krajiny a životního prostředí a způsobí změny v charakteristice vodního toku, proto je třeba takový projekt plánovat nejen z hlediska energetického, ale hodnotit také ekonomické a přírodní aspekty [1]. Roli mohou hrát také lokální ekonomické faktory, například pokud by výstavba měla být v lokalitě, která ve velkém dováží palivo pro konvenční elektrárny, výstavbou dojde k ovlivnění ekonomické situace a omezení nákladů na dovoz paliva, ušetřené náklady pak lze použít pro lokální investice [1].

## 1.1 Energie vody

Voda má přirozeně tři druhy energie, jedná se o mechanickou, tepelnou a chemickou [2, 3]. Pro přeměnu energie vody na elektrickou energii je nejvhodnější využít energie mechanické, kterou lze dále rozdělit na energii kinetickou a potenciální [3].

Teoretický ziskatelný výkon vodního toku  $P$  (W) je vypočten z potenciální energie a je závislý na průtoku  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), hustotě média  $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a výškovém rozdílu  $H$  (m) [1, 3, 4]. Rovnici výkonu pak lze zapsat jako [1, 3, 4]:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H = m \cdot E \quad (1.1)$$

Dle rovnice (1.1) změni 1 kg kapaliny svojí měrnou energii o hodnotu  $E = g \cdot H$  [3, 4]. Z uvedené rovnice (1.1) jsou pro výstavbu elektrárny, určení lokality, výběru vodního motoru, atd. určující dva parametry, a sice průtok  $Q$  a výškový rozdíl  $H$ , nazývaný spád [1]. Tyto dva parametry vodního toku lze také ovlivňovat, průtok můžeme regulovat a spád je možné soustředit například výstavbou přehrady [1, 3, 4]. Teoretický výkon nelze využít celý, je nutné počítat se ztrátami hydraulickými, objemovými, při převodu mechanické energie na elektrickou a s omezeními vlivem podmínek, hydrologických, geologických a topografických [3, 4]. Úpravou rovnice (1.1) o ztráty lze dojít do tvaru [3]:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta \quad (1.2)$$

kde  $\eta$  je účinnost. Tato rovnice (1.2) popisuje celkový výkon elektrárny.

## 1.2 Vodní elektrárny

Z výše uvedené rovnice (1.1) vyplývá, že pro získání velkého výkonu je třeba v lokalitě elektrárny uměle soustředit spád a průtok [2, 3]. Spád lze uměle soustředit výstavbou jezu či přehrady, dále pak vybudováním derivačního kanálu, nebo využitím přílivu a odlivu moře [2, 3]. Průtok pak lze uměle soustředit ve vlastním povodí, přivedením vody z jiného povodí, nebo umělým přečerpáním vody a její akumulací [2, 3].

Vodní elektrárny jsou kategorizovány dle instalovaného výkonu, dle využívaného spádu. Dále je můžeme dělit dle způsobu využití vodního toku [2, 3].

Dělení dle instalovaného výkonu [2, 3]:

- výkon do 10 MW - malé elektrárny,
- výkon do 200 MW - střední elektrárny,
- výkon nad 200 MW - velké elektrárny.

Dělení dle využitého spádu [5]:

- nízkotlaké - spád do 20 m,
- středotlaké - spád mezi 20 a 100 m,
- vysokotlaké - spád nad 100 m.

Dělení dle využití vodního toku [3, 5]:

- průtočné vodní elektrárny,
- jezové vodní elektrárny,
- derivační vodní elektrárny,
- přečerpávací vodní elektrárny,
- přehradní a přehradně derivační vodní elektrárny.

Typická vodní elektrárna se skládá z vtokového objektu, potrubí a přivaděče, strojovny a výtokového objektu. Energie vody je ve strojovně předávána vodnímu motoru [1].

## 2 Vodní motory

Vodní motor je používán k přeměně energie vody na mechanickou energii otáčející se hřídele, nebo energii pohybujícího se pístu, tyto dva druhy energie se dále využívají k přeměně na elektrickou energii pomocí generátoru [3]. Vodní motory prošly dlouholetým vývojem, historicky starší vodní kola, byly původně využívány pro pohon mlýnů, později i v elektrárnách a vrchol jejich vývoje skončil v 20. století [3]. Vodní kola byla v energetice postupně nahrazena vodními turbínami, které dosahují lepších účinností a vyšších výkonů při menších rozměrech [3]. Přesto jsou i vodní kola v malých vodních elektrárnách dodnes využívána, zejména díky své jednoduché konstrukci [3].

### 2.1 Vodní kola

První zmínky o vodním kolu lze v historických pramenech nalézt již v dobách př.n.l., kolo se používalo na dopravu vody do závlahových kanálů [6]. Dalšího velkého využití se kola dočkala v mlýnech, kde byly používány jako zdroj mechanické energie [6]. Tento způsob získání mechanické energie byl překonán až parním strojem [7]. V energetice byla vodní kola hojně využívána, až do počátku minulého století, poté je nahradily vodní turbíny [3]. Dnes lze s výhodou použít v lokalitách s malým spádem do 1,5 m a to protože jsou vodní kola levná a konstrukčně jednoduchá, dále nevyžadují stavbu vzdouvacího zařízení a není je třeba chránit před listy, větvemi, ledovou tříští, a podobně [3]. Ačkoliv se historicky jedná o nejstarší vodní motor, nelze dnes říci, že by byla technicky zastaralá, při vhodném návrhu mohou dosahovat účinností až 70% [2]. Vodní kola jsou navrhována dle historických zkušeností a jsou popsána empirickými výrazy [2].

### 2.1.1 Dělení vodních kol

Vodní kola lze kategorizovat dle způsobu nátoky vody na kolo, dle způsobu využití energie, nebo podle směru otáčení kola vůči proudu dolní vody [3].

Podle nátoky vody na kolo dělíme na kola [3]:

- se svrchním nátokem,
- se středním nátokem,
- se spodním nátokem.

Podle způsobu využití vodní energie se dělí na [3]:

- lopatková (převážně využití kinetické energie vody),
- korečková (převážně využití potenciální energie vody).

Podle směru otáčení kola vůči proudu dolní vody [3]:

- s otáčením ve směru proudu spodní vody,
- s otáčením proti směru dolní vody.

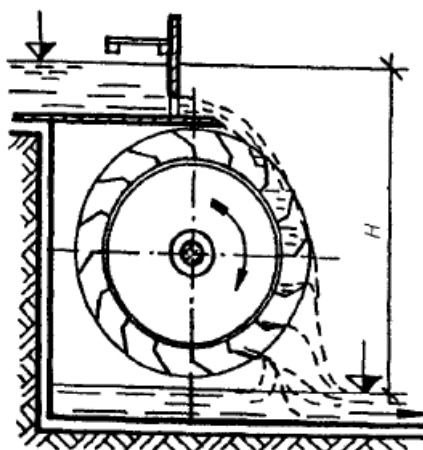
### 2.1.2 Kola lopatková

Tato kola využívají kinetické energie vodního toku. V nejjednodušších verzích s rovnými lopatkami vstupuje voda kolmo do lopatky, kde předává svojí kinetickou energii [8]. Toto jednoduché provedení se označuje jako hřebenáč [3]. Tento způsob nedosahuje vysoké účinnosti, proto byla snaha o jeho zlepšení. S lepším tvarem přišel francouzský inženýr Jean-Victor Poncelet, který navrhl kolo s prohnutými lopatkami, což vedlo k vyšší účinnosti [8]. Lopatková kola jsou konstruována na spodní, případně střední nátok [3]. Lopatková vodní kola byla typicky využita pro spády od 0,1 m až do 2,5 m a využívala se při průtocích  $1,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  až  $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  [3].



### 2.1.3 Korečková vodní kola

Korečková kola využívají převážně potenciální energii [3]. Kolo je tvořeno korečky, uzavřenými lopatkami, do kterých nateče voda a působí svojí hmotností, čímž nutí kolo k pohybu [3]. V dolní části kola je potenciální energie vyčerpána a voda volně opouští korečky [3]. Korečky je třeba plnit vodou maximálně do poloviny své hloubky při obvodové rychlosti do 2 m/s, při větší obvodové rychlosti by odstředivá síla způsobovala předčasné vylití vody [3]. Kolo je umístěno nad spodní hladinou [3]. Kola byla nejčastěji konstruována s horním nátokem, ale lze je použít i pro střední nátok [2, 3]. Příklad uspořádání korečkového vodního kola lze vidět na obrázku níže [3].

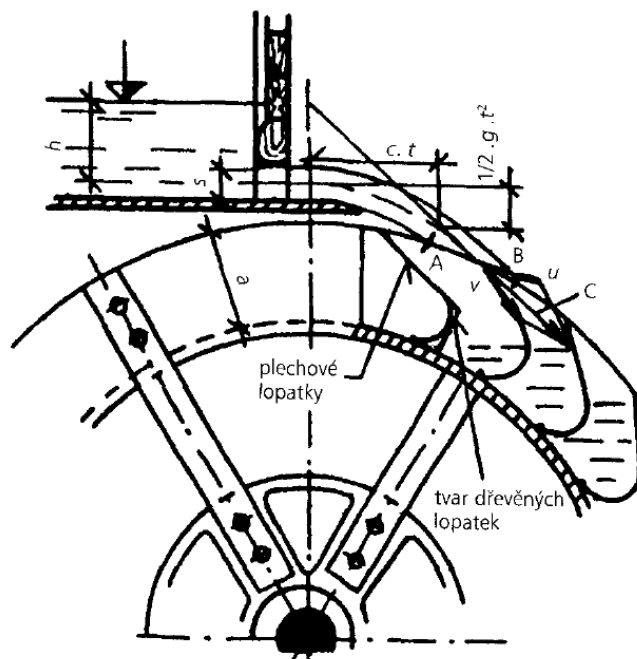


Obr.: 2.1 Uspořádání korečkového vodního kola. (převzato z [2])

Následující matematické odvození korečkového kola je převzato ze zdroje [2]. Ze zkušenosti je určeno, že vhodná výtoková rychlost vody, značeno  $c$ , z náhonu je rovna 2,5 násobku obvodové rychlosti kola, značeno  $u$ . Vhodná obvodová rychlost je stanovena historickou zkušeností a je z rozsahu 1,5 až 2,5 m/s. Z Torricelliho výrazu lze určit výtokovou rychlost:

$$c = \varphi \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.1)$$

V této rovnici je  $\varphi$  výtokový součinitel z rozsahu 0,9 až 0,95 a  $h$  je vzdálenost těžiště výtokového otvoru pod hladinou v metrech. Teoretický tvar lopatek korečkového kola je vidět na obrázku níže:



Obr.: 2.2 Tvar lopatek a důležité veličiny kola s horním nátokem. (převzato z [2])

Pohyb vody ve vodorovném směru v závislosti na čase  $t$  lze určit podle rovnice:

$$x = c \cdot t \quad (2.2)$$

A dráhu ve svislém směru lze popsat rovnicí:

$$y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (2.3)$$

Dosazením rovnice (2.2) do rovnice (2.3) se lze zbavit času a dostaneme rovnici ve tvaru:

$$y = \frac{1}{2} \cdot c^{-2} \cdot g \cdot x^2 \quad (2.4)$$

Uvedená rovnice (2.4) je matematický popis paraboly. Zároveň je rovnicí popisující proudové vlákno vytékající vody. Pro dobrou účinnost vodního kola je vhodné, aby voda vstupovala do kola bez nárazu a bez rozstříkávání vodního proudu. Začátek lopatky by měl být zakřiven ve směru rychlosti vody. Mezera mezi lopatkami se volí širší, než je šířka vodního paprsku, aby z korečků mohl snáze unikat vzduch a lépe se plnili. Hloubka korečků  $a$  se volí v rozsahu 0,25 až 0,40 m. Šířka korečků  $b$  je volena tak, aby byla v souladu s následující rovnicí:

$$Q = \psi \cdot a \cdot b \cdot u \quad (2.5)$$

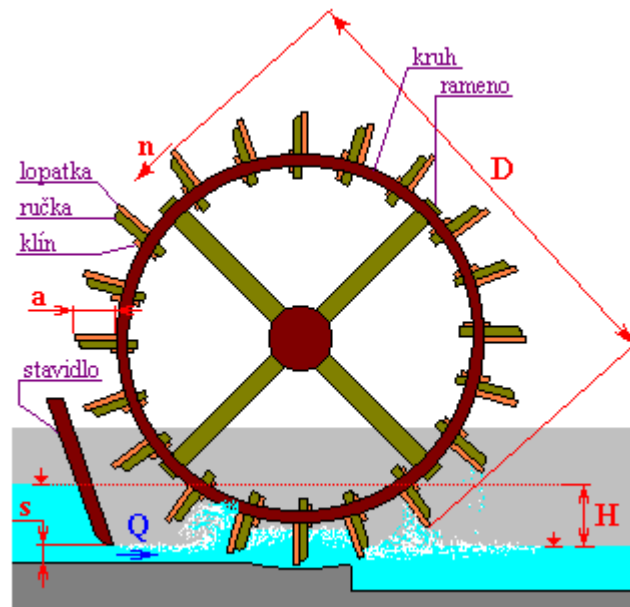
$\psi$  v dané rovnici symbolizuje součinitel plnění korečků (obvykle voleno cca 0,3). Lopatky mohou být dřevěné, nebo plechové, plechovou lopatku lze vytvarovat do požadovaného obloukového tvaru, dřevěná lopatka oblouk aproximuje lomením z více segmentů.

#### 2.1.4 Jednotlivé druhy vodních kol

Následující podkapitola popisuje jednotlivé typické zástupce vodních kol.

##### 2.1.4.1 Strikový hřebenáč

Technologicky nejjednodušší možná konstrukce vodního kola. Jedná se o lopatkové kolo pro spodní nátok [9]. Kolo je tvořeno soustavou rovných lopatek, které jsou spojeny bočními věnci [2, 9]. Voda je ke kolu přiváděna přes stavidlo, které transformuje spád a potenciální energii vody na kinetickou energii vodního paprsku [9]. Voda vstupuje kolmo do lopatek a opírá se o ně, čímž předává svoji kinetickou energii [9]. Vzhledem ke kolmému vstupu dochází při nárazu k víření a rušení vstupujícího paprsku, což snižuje účinnost [9]. Po odevzdání energie voda volně opouští lopatky [9]. Hřebenáč dosahuje účinností maximálně 35 % [9]. Na obrázku 2.3 lze vidět princip hřebenáče společně se základními parametry. Výpočet hřebenáče je určen následujícími empirickými vztahy podle [3].



Obr.: 2.3 parametry pro výpočet hřebenáče (převzato z [9])

Průměr kola  $D$  je určen v závislosti na spádu dle rovnice:

$$D = (3 \div 5) \cdot H \quad (2.6)$$

Otáčky kola jsou určeny z průměru kola  $D$  a obvodové rychlosti  $u$  dle následující rovnice:

$$n = \frac{60 \cdot u}{\pi \cdot D} \quad (2.7)$$

Obvodovou rychlost lze určit z teoretické průtokové rychlosti  $c$ , která je definována spádem  $H$ . Rychlost je omezena průtokovým koeficientem  $\mu$  (často 0,4):

$$n = \mu \cdot c = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (2.8)$$

Šířku lopatek lze stanovit z průtoku  $Q$ , obvodové rychlosti  $u$  (typicky 0,5), stupni plnění  $e$  a Redtenbacherova koeficientu  $r$ .

$$b = \sqrt{\frac{Q \cdot r}{e \cdot u}} \quad (2.9)$$

Délka lopatky je určena šířkou lopatky a Redtenbacherovým koeficientem  $r$ .

$$a = \frac{b}{r} \quad (2.10)$$

Redtenbacherův koeficient lze spočítat ze spádu  $H$  a průtoku  $Q$ :

$$r = 1,75 \cdot \sqrt[3]{\frac{H \cdot Q \cdot \rho}{75}} \quad (2.11)$$

Dále je třeba určit rozteč lopatek  $t$ , která je závislá na délce lopatky  $a$

$$t = 0,75a + 0,1 \quad (2.12)$$

Počet lopatek  $L$  lze určit z rozteče lopatek  $t$  a obvodu kola  $o$

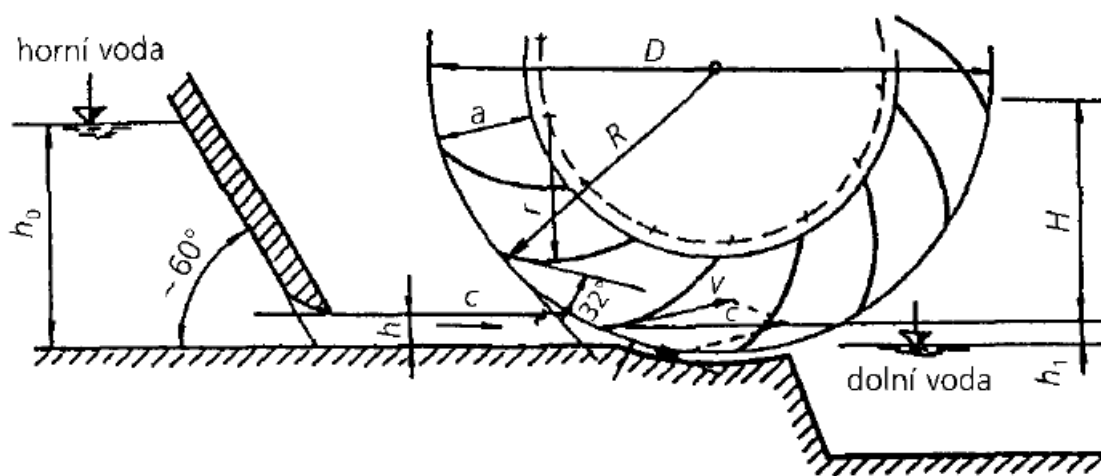
$$L = \frac{o}{t} = \frac{\pi \cdot d}{t} \quad (2.13)$$

#### 2.1.4.2 Ponceletovo kolo

Ponceletovo kolo pracuje na stejném principu jako stříkový hřebenač, jedná se tedy o lopatkové kolo určené pro spodní vodu [2, 10]. Impulsem pro jeho vývoj byla malá účinnost hřebenače [2, 10]. Lopatky mají zakřivený profil, čímž voda do lopatky vstupuje postupně a ne nárazově, tím se eliminují největší ztráty [2, 10]. Voda vstupuje do zakřiveného profilu lopatky a postupně vyběhne nahoru [2, 10]. Pohybem po lopatce voda odevzdává svojí kinetickou energii [2, 10]. Poté, co je kinetická energie vyčerpána

začne voda klesat zpět po profilu a opět tak na lopatku působí silou, předání energie tedy probíhá při pohybu vody po lopatce směrem nahoru i dolů [2, 10]. Voda ideálně opouští lopatku v okamžiku, kdy je konec lopatky kolmo ke spodní hladině. Ponceletovo kolo dosahuje účinností 65 %, někdy se uvádí až 70 % [2, 10].

Návrh Ponceletova kola vychází opět z empirických vztahů ze zdroje [2]. Na obrázku níže je vidět uspořádání Ponceletova kola společně se charakteristickými parametry.



Obr.: 2.4 parametry Ponceletova kola (převzato z [2])

Pro Ponceletovo kolo je určující rychlost vody v přívodním žlabu, rychlost je určena jako  $v \leq 1,2$  m/s.

Šířka kola  $b$  je určena ze vztahu:

$$b = (5,27 \div 6) \frac{Q}{H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad (2.14)$$

S šířkou kola je spjata šířka přívodního kanálu vztahem:

$$b_1 = b - 0,1 \quad (2.15)$$

Výška hladiny v kanálu je definována vztahem:

$$h_0 = \frac{Q}{v \cdot b_1} \quad (2.16)$$

Průměr Ponceletova kola  $D$  je spočten dle následujících rovnic:

$$\text{pro } H \leq 1 \text{ m: } D = 3,25 \cdot \frac{Q}{b \cdot \sqrt{H}} \quad (2.17)$$

$$\text{pro } H > 1 \text{ m: } D = 4,33 \cdot \frac{Q}{b \cdot \sqrt{H}} \quad (2.18)$$

Výška výtoku za stavidlem  $h$  je volena v rozsahu 0,17 až 0,2 násobku spádu  $H$ . Výška vodního sloupce za vodním kolem je určena jako 0,7 násobek spádu  $H$ .

Dále lze určit rychlost vody  $c$  přitékající k vstupním hranám lopatek jako:

$$c = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - h)} \quad (2.19)$$

Obvodová rychlost vodního kola  $u$  je určena vztahem:

$$u = (0,55 \div 0,60) \cdot c \quad (2.20)$$

Nebo

$$u = 2,44 \cdot \sqrt{H} \quad (2.21)$$

Délka lopatek ve směru proudění je určena vztahem:

$$a = (0,47 \div 0,50) \cdot H \quad (2.22)$$

Nebo

$$a = (0,11 \div 0,57) \cdot D \quad (2.23)$$

Počet otáček lze určit jako:

$$n = 19,11 \cdot \frac{u}{D} \quad (2.24)$$

Rozteč lopatek  $t$  a počet lopatek  $i$  je stanoven:

$$t = 0,3 \cdot H \quad (2.25)$$

$$i = \frac{\pi \cdot D}{t} \quad (2.26)$$

Poloměr zakřivení lopatek  $r$  lze spočítat dle:

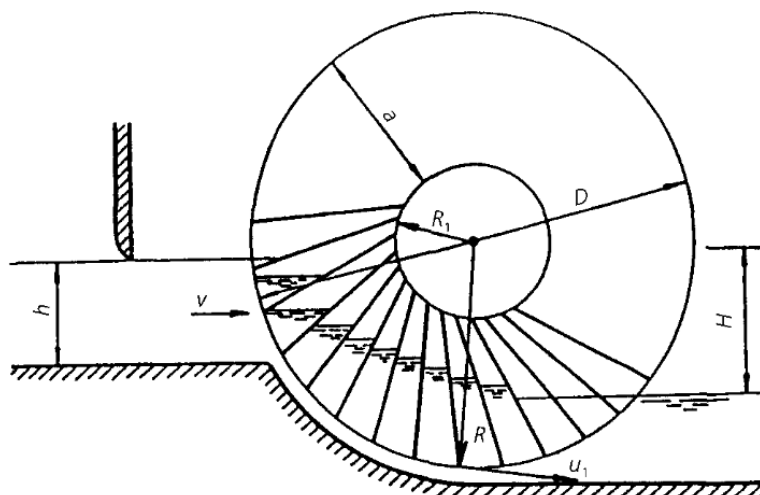
$$r = (0,44 \div 0,60) \cdot H \quad (2.27)$$

Úhel mezi tečnou k zakřivení lopatky na vstupní hraně a tečnou krajnice kola je zpravidla určen jako  $32^\circ$ .

### 2.1.4.3 Sagebienovo vodní kolo

Sagebienovo vodní kolo (obr. 2.5) dokáže využívat kinetické i potenciální energie a lze jej označit za rozhraní mezi lopatkovými a korečkovými vodními koly [2]. Kolo je vhodné pro využití se středním nátokem. Lopatky jsou rovné a jsou mírně zešíkmené vůči vtoku vody. Směrem ke středu kola se mezilopátkový prostor zužuje. Kolo lze využít na spádech 0,7 m až 2,5 m, při průtoku 0,6 až 4 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> [2]. Obdobou Sagebienova kola je kolo Zuppingerovo, které má místo rovných lopatek, lopatky zakřivené [2].





Obr.: 2.5 Sagebienovo vodní kolo (převzato z [2])

Základní geometrii Sagebienova kola dle [2] lze určit z následujících rovnic:

průměr vodního kola je vypočten jako:

$$D = 4 + 2 \cdot H \quad (2.28)$$

šířka kola je pak vypočtena podle:

$$b \geq \frac{4 \cdot Q}{v \cdot D} \quad (2.29)$$

v uvedené rovnici (2.29) je doporučená vstupní rychlost vodního proudu na lopatku v rozmezí 0,6 až 0,8 m.s<sup>-1</sup>.

délku lopatek dle rovnice:

$$a = (0,165 \text{ až } 0,330) \cdot D \quad (2.30)$$

Vzdálenost lopatek je určena z rozsahu mezi  $t = 0,2$  až  $0,33$  m, a dále obvodová rychlost  $u_1 = 0,5$  až  $0,9$  m.s<sup>-1</sup>. Na základě zvolených parametrů lze určit počet otáček  $n$  dle následující rovnice:

$$n = 9,554 \cdot \frac{u_1}{0,5 \cdot D} \quad (2.31)$$

hloubka vody v přívodním žlabu je rovna spádu a obvykle je volena menší než 1,4 m.

## 2.2 Vodní turbíny

Vodní turbíny jsou historicky mladší, než vodní kola, která postupně nahradily. Vodní turbíny jsou konstrukčně složitější a obecně dosahují vyšší účinnosti, než vodní kola. Jsou v současnosti nejrozšířenějším druhem vodního motoru v energetice. Rozlišujeme dva základní druhy vodních turbín, dle způsobu přeměny energie, tedy rovnotlaké a přetlakové [2, 3].

Rovnotlaká, neboli akční turbína, přeměňuje pouze kinetickou energii na rotační pohyb hřídele [2, 3]. Kinetická energie je ve formě vodního paprsku přiváděna do oběžného kola turbíny, kde paprsek odevzdává svoji kinetickou energii [2, 3]. Na vstupu i výstupu oběžného kola je stejný tlak, proto se nazývají rovnotlakými [2, 3]. U principu rovnotlaké turbíny lze rozlišit dvě pracovní fáze. V první fázi se jedná o přenos kinetické energie vodního paprsku z výstupu trysky směrem k lopatce oběžného kola turbíny [2, 3]. Druhá fáze je pak samotné působení vodního paprsku na lopatku oběžného kola. Obě ze zmíněných fází ovlivňují celkovou činnost energetické přeměny [2, 3]. V první fázi je důležité, aby vodní paprsek zachoval svou kompaktnost, celistvost a tvar po celou dráhu letu [2, 3]. V druhé fázi je řešení zaměřeno především na optimální účinek dopadu vodního paprsku na lopatku vodní turbíny [2, 3].

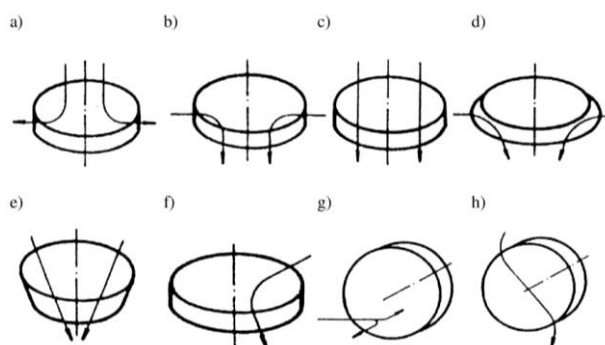
Turbína přetlaková, neboli reakční, využívá ke své činnosti energii kinetickou a zároveň energii tlakovou [2, 3]. Přivedená energie je rovnoměrně rozmístěna po obvodu rozvaděče turbíny a po obvodu vstupních hran lopatek oběžného kola turbíny [2, 3]. Větší část energie přiváděné vody se v oběžném kole mění v mechanickou energii rotující hřídele [2, 3]. Zbytková energie je vedena do savky, která zajišťuje dodatečnou přeměnu zbytkové energie na energii mechanickou [2, 3]. Rotace oběžného kola je způsobena reakcí proudu vody vedeného mezilopátkovými kanály, které jsou nepohyblivé a tvoří je prostory mezi lopatkami rozvaděče turbíny [2]. Reakční síly zakřiveného proudu vody působí na lopatky oběžného kola turbíny a nutí tak turbínu k pohybu [2]. Prostory mezi lopatkami

oběžného kola tvoří tzv. pohyblivé kanály [2]. Přetlakové turbíny pracují tedy s pohyblivými i nepohyblivými kanály [2]. U přetlakových turbín je třeba sledovat přenos hydraulické energie soustavou pohyblivých a nepohyblivých kanálů [2]. Optimalizací tohoto procesu lze dosáhnout vysoké účinnosti [2].

Kromě výše uvedeného dělení, lze turbíny kategorizovat dle průtoku vody oběžným kolem vzhledem k ose rotace. Rozdělení je popsáno a vyobrazeno v následující tabulce 2.1 a na obrázku 2.6 [3].

Tabulka 2.1 rozdělení turbín dle průtoku oběžným kolem [3]

	Způsob průtoku	Princip
a)	Centrifugální turbína	Voda vtéká do kola rovnoběžně s osou a vytéká z oběžného kola směrem od hřídele
b)	Centripetální turbína	Voda vtéká kolmo na osu rotace a vytéká rovnoběžně s osou
c)	Axiální turbína	Voda protéká rovnoběžně s osou rotace
d)	Radiálně-axiální turbína	Proudění vody začíná radiálně a po přiblížení k ose rotace se směr mění na axiální
e)	Diagonální turbína	Voda protéká šikmo k ose rotace
f)	Turbína se šikmým průtokem	Vstup do oběžného kola je z boku a výstup ve směru osy
g)	Tangenciální turbína	Voda proudí v tangenciálním směru
h)	Turbína s dvojím průtokem	Vstup vody je centripetální a výstup je centrifugální



Obr.: 2.6 Rozdělení turbín podle průtoku vody (převzato z [3])

Dále lze turbíny rozdělit dle polohy hřídele. Toto dělení zahrnuje turbíny horizontální, vertikální a šikmé [3].

Další možností dělení je podle vstupní části turbíny. Turbíny mohou být spirální, kdy je spirála umístěna před rozvaděčem, dále kašnové, kdy je turbína umístěna v kašně s volnou hladinou, následně kotlové, což označuje koncové těleso na konci tlakového přívodu, dalším typem jsou turbíny násoskové, u kterých lze zavzdušněním přerušit průtok

a nakonec, turbíny přímoproudé, které charakterizuje přímý průtok vody od vstupu po výstup [3].

### 2.2.1 Výkon a energetická bilance turbín

Teoretický výkon turbíny lze určit dle níže uvedeného vzorce (2.32) jako součin průtoku  $Q$ , hustoty kapaliny  $\rho$ , gravitační konstanty  $g$  a výškového rozdílu  $H$  [2, 3]:

$$P_t = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \quad (2.32)$$

Tento teoretický výkon nelze turbínou získat celý, protože je potřeba počítat se ztrátami při přeměně hydraulické energie na energii mechanickou [2, 3]. Proto zavádíme další veličinu nazývanou efektivní výkon turbíny  $P$  ve vzorci (2.33), která je upravena o koeficient účinnosti  $\eta$  a je nižší než výkon teoretický [2, 3].

$$P = P_t \cdot \eta \quad (2.33)$$

Účinnost turbíny lze určit jako poměr skutečného výkonu turbíny na hřídeli a teoretického výkonu turbíny [2]. Účinnost vyjadřuje ztráty vzniklé při přeměně hydraulické energie na mechanickou [2]. Účinnost turbíny je tvořena trojicí ztrát, a sice ztrátami objemovými, hydraulickými, mechanickými [2].

Přivedený průtok vody  $Q$  ve skutečnosti celý neprochází oběžným kolem turbíny [2]. Menší část přivedené vody obtéká oběžné kolo netěsnostmi mezi oběžným kolem a ostatními součástmi turbínového soustrojí [2]. Další malá část vody může uniknout ucpávkou turbíny. Přiváděný průtok je tedy zmenšen o násobek volumetrické účinnosti  $\eta_v$  [2].

$$Q_{ef} = \eta_v \cdot Q \quad (2.34)$$

Z teoreticky využitelného spádu, který lze použít pro turbínu je část energie spotřebována na překonání průtokových odporů [2]. Tyto odpory způsobují hydraulické ztráty a jsou způsobeny třením vody o stěny turbínových kanálů, dále změnou směru proudění vody, či změnou průřezu proudící vody, a také vlivem víření vody [2]. Dále se mezi hydraulické ztráty počítají ztráty rázem při nesprávném vstupu vody do lopatek

oběžného kola [2]. Využitelný spád pro turbínu je nižší než spád teoretický a je upraven o hydraulickou účinnost [2].

$$H_{ef} = \eta_h \cdot H \quad (2.35)$$

Tření v ucpávkách hřídele turbíny, v ložiscích turbíny, a tření na vnějších plochách oběžného kola o obklopující vodu tvoří mechanické ztráty [2]. Mechanické ztráty lze charakterizovat součinitelem  $\eta_m$ , který se nazývá mechanická účinnost [2]. Výše uvedenou rovnici (2.33) lze upravit do následujícího tvaru [2]:

$$P = P_t \cdot \eta = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (2.36)$$

Trojice účinnostních koeficientů ve výše uvedené rovnici (2.36) tvoří celkovou účinnost turbíny [2, 3].

$$\eta_t = \eta_Q \cdot \eta_h \cdot \eta_m \quad (2.37)$$

Účinnost turbíny se pohybuje přibližně v intervalu 0,85 až 0,93 při optimálním spádu a průtoku [2, 3].

Mechanický výkon turbíny je dále použit pro pohon generátoru, kde probíhá přeměna na elektrický výkon [2, 3]. Účinnost generátorů se pohybuje v intervalu od 0,85 až do 0,97 [2, 3]. Pokud není generátor s turbínou na společné hřídeli, vznikají také ztráty v převodu [2, 3]. Další snížení energie způsobuje zvyšovací transformátor za generátorem [2, 3]. Jejich účinnost je v rozmezí 0,92 až 0,98 [2, 3].

## 2.2.2 Peltonova turbína

První zmínky o Peltonově turbíně se datují do roku 1880, kdy byla představena americkým vynálezcem Lestrem Allanem Peltonem [11, 12]. Peltonova turbína je nejčastěji používaným zástupcem rovnotlakých turbín [11, 13]. Peltonova turbína najde své využití pro velké spády a malé průtoky. Velké stroje dosahují účinnosti až 95 %, menší stroje určené pro malé vodní elektrárny dosahují účinnosti 85 % [11].



Obr.: 2.7 Oběžné kolo Peltonovy turbíny včetně trysek ( převzato z [14])

### 2.2.2.1 Princip Peltonovy turbíny

Voda je k turbíně přiváděna tlakovým potrubím, kde se potenciální energie mění na tlakovou [2, 13]. Tlakové potrubí je zakončené dýzou, která má účinnost v rozmezí 95 až 98 % [2, 3, 12]. V dýze probíhá přeměna tlakové energie v kinetickou [3, 13]. Kinetická energie ve formě tenkého vodního paprsku následně vstupuje do lopatky oběžného kola turbíny, kde odevzdává svoji energii [3, 13]. Voda do oběžného kola vstupuje tangenciálně a poté volně odpadá do prostoru pod turbínou [3, 13].

### 2.2.2.2 Konstrukční provedení

Oběžné kolo turbíny je tvořeno nábojem, na jehož obvodu jsou rozmístěny oběžné lopatky, které mají tvar dvojice korečků rozdělených dělicím břitem v rovině kolmé na osu

otáčení [3, 12]. Korečky jsou na vnějším obvodu vyříznuté tak, aby při otáčení nedocházelo k vychýlení vodního paprsku [3, 12].

Celkový počet lopatek se pohybuje od dvanácti do čtyřiceti [2]. Prostorové provedení může být horizontální, nebo vertikální [2]. V horizontálním provedení je voda přiváděna nejčastěji jednou až dvěma tryskami [2]. Ve vertikálním provedení se používají více vstříkové varianty se čtyřma až šesti vstříky [2]. Samotné oběžné kolo se nachází v turbínové skříni, která zabraňuje úniku vody od lopatek do strojovny a zároveň usměrňuje odtok odpadní vody [2]. Turbíny s více tryskami dosahují větší efektivity, nicméně materiál lopatek je rychleji opotřebován a turbína je vystavena většímu množství cyklického namáhání [1]. Pro stejný spád a průtok znamená zvýšení počtu trysek menší průměr oběžného kola a vyšší rychlost [1].

Průměr oběžného kola Peltonovy turbíny lze navrhnout vzhledem k provozním otáčkám, díky čemuž není potřeba používat převod, což zvyšuje účinnost celkového soustrojí [2]. Menší stroje mohou být upevněny přímo na hřídeli generátoru [2]. Toto bohužel nelze použít při velkých výkonech, při vertikálním řešení nad 50 kW a při horizontálním nad 200 kW [2].

V případě menších strojů je oběžné kolo spolu s lopatkami možné odlít jako jeden celek [2]. Naopak u velkých strojů jsou jednotlivé lopatky montovány na oběžné kolo [2].

### **2.2.2.3 Regulace a řízení**

Změnou průtoku vody přes výstupní trysky lze regulovat přiváděný výkon [2, 3, 13]. Uvnitř trysky je vložen jehlový uzávěr, kterým lze pohybovat ve směru osy trysky [2, 3, 13]. U malých strojů může být regulace ruční, pro větší stroje je regulace hydraulická [2, 3, 13]. Regulaci je potřeba provádět plynule, aby nedošlo k rázovému jevu [2, 3, 13]. Pro případ rychlého odstavení se použije odklonění vodního paprsku před jeho dopadem na lopatku [2, 3, 13]. K tomu slouží zařízení deflektor, nebo deviátor [2, 3, 13]. Deviátor umožňuje pouze hrubé odstavení, zatímco deflektorem lze odklonit i jen část paprsku, a díky tomu umožňuje jemnější regulaci [2, 3, 13].

### 2.2.3 Kaplanova turbína

V roce 1919 vylepšil prof. Kaplan stávající model vrtulové turbíny [2, 3]. Principiálně se jedná o přetlakovou turbínu [2, 3]. Její hlavní výhodou je systém dvojité regulace pro dosažení velké účinnosti i při proměnném průtoku [2, 3]. Využití Kaplanovy turbíny je pro spády od 1.5 do 75 m [1, 2]. Reálně se používají spíše pro spády do 35 m, kvůli riziku vzniku kavitace, kvůli které je nutné řešit antikavitační ochranu lopatek [1]. Unikátním případem je umístění Kaplanovy turbíny v přehradě Orlík, kde pracuje při vysokém spádu 70,5 m [3].



Obr.: 2.8 Kaplanova turbína Orlík (převzato z [15])

#### 2.2.3.1 Princip Kaplanovy turbíny

Přívod vody ke Kaplanově turbíně je proveden spirálovým potrubím nebo kašnou [2, 3, 13]. Voda je dále rovnoměrně distribuována po obvodu rozváděcím kolem s lopatkami, které usměrňují tok vody [2, 3, 13]. Po usměrnění voda vstupuje do oběžného kola turbíny, kde probíhá předání energie [2, 3, 13]. Poté je voda odváděna savkou, která umožňuje dodatečné využití zbytkové energie [2, 3, 13].



### 2.2.3.2 Konstrukční provedení a regulace

Oběžné kolo je tvořeno nábojem a lopatkami. Počet lopatek je v závislosti na spádu v rozmezí 3 až 10 [2, 13]. Uvnitř náboje je mechanismus, sloužící pro natáčení lopatek oběžného kola, který zajišťuje jeden ze dvou stupňů regulace [2, 3]. Mechanismus otočení lopatek je poháněn hydraulicky, nebo elektromotoricky [2]. Pro malé stroje může být tvořen i mechanickým šroubovým převodem, při odstavené turbíně [3]. Lze se setkat i s řešením, kdy je třeba lopatky uvolnit a pootočit jednotlivě [2]. S rostoucím počtem lopatek se zvětšuje i průměr náboje, kvůli umístění otočného mechanismu lopatek [2]. Oběžné kolo je umístěno pod rozváděcím kolem (rozvaděčem) [2]. Náboj oběžného kola je prodloužen kuželovitým tvarem do savky, aby nedocházelo ke skokové změně průtočného profilu [2].

Kaplanova turbína může být řešena jako vertikální, horizontální nebo šikmá [2, 13]. Pro velké stroje se používá hlavně uspořádání vertikální [2, 13]. Rozvaděč je tvořen 24 až 32 rozváděcími lopatkami, jejichž poloha je řízena regulátorem [2, 13]. Regulátor je přes kulisu spojen s polohou lopatek oběžného kola. Změna otáček hydroagregátu vyvolává zavírání nebo otevírání lopatek oběžného kola, čímž je regulován objem vody tekoucího do oběžného kola, zároveň se lopatky oběžného kola natácejí do ideální polohy [1–3]. Tento systém dvojité regulace umožňuje dosahovat již zmíněné vysoké účinnosti ve velkém rozsahu proměnných spádů a průtoků [1–3]. Vysoká účinnost a variabilita je vykoupena složitým technickým řešením a vyšší realizační cenou [1–3].

Kaplanovy turbíny dosahují vysokých hodnot kavitačního součinitele, což klade vyšší nároky na použití speciálních materiálů odolných vůči kavitačnímu opotřebení [3, 13].

### 2.2.3.3 Odvozené konstrukce

Mezi odvozené varianty patří propelerová turbína s nastavitelnými lopatkami rozvaděče a pevnými lopatkami oběžného kola, dále Thomannova turbína s pevným rozvaděčem a regulovatelnými lopatkami oběžného kola a nakonec neregulovatelná axiální turbína, který má pevný rozvaděč i oběžné lopatky [3].

Propelerová turbína využívá systém jednoduché regulace a je tak konstrukčně jednodušší a levnější [3]. Oběžné kolo s lopatkami může být tvořeno jedním odlitkem,

častěji jsou náboj a lopatky odlity zvlášť a spojeny šroubovým spojem, který umožňuje změnu natočení lopatek při odstavení turbíny [3].

Oproti propelerové turbíně je Thomannova turbína komplikovanější z důvodu regulace v náboji oběžného kola, nicméně dosahuje vyšší účinnosti [12]. Protože lopatky rozváděcího kola jsou pevné vyvstává problém s okamžitým odstavením turbíny, proto je v přívodu vody vestavěn uzávěr [12].

Neregulovatelná axiální turbína je určena pro levnější aplikace a je efektivní pouze pro konkrétní hodnotu spádu a průtoku, je ji vhodné použít v lokalitách, kde lze předpokládat konstantní podmínky [1, 3]. Díky nízkým nákladům je vhodná pro malé vodní elektrárny [1, 3].

## 2.2.4 Dériazova turbína

Dériazova turbína vznikla v roce 1950 a pracuje na stejném principu jako Kaplanova turbína [3, 13]. Jedná se o přetlakovou diagonální turbínu [3, 13]. Základní odlišnost od Kaplanovy turbíny je pootočení osy natáčivých lopatek oběžného kola vůči ose samotného kola pod úhlem  $30^\circ$  až  $60^\circ$  [3, 13]. Nejčastěji používaným sklonem je  $45^\circ$  [1, 13]. Náboj oběžného kola má kónický tvar [1, 3]. Dériazova turbína využívá stejného systému dvojí regulace jako turbína Kaplanova [1, 3]. Oproti Kaplanově turbíně je Dériazova turbína technicky náročnější a dosahuje lepších provozně-ekonomických vlastností [1, 3]. Díky své konstrukci může být přiváděč menších rozměrů než u Kaplanovy turbíny [1]. Rozvaděč může být v radiálním nebo diagonálním provedení [3]. Dériazova turbína může být provozována také jako reverzibilní v přečerpávacích vodních elektrárnách, kde pracuje v turbínovém i čerpadlovém provozu [13].



Obr.: 2.9 Dériazova turbína (převzato z [16])

### 2.2.5 Francisova turbína

Turbína navržená J. B. Franciséem je nejdéle využívaným modelem moderních turbín. Principiálně se jedná o přetlakovou radiálně axiální turbínu. Francisova turbína disponuje širokou škálou použitelných spádů. Spády se mohou pohybovat od 15 do 750 m [1]. Jsou také konstruovány ve velkém rozsahu výkonů od 0,2 MW až do 820 MW [1].



Obr.: 2.10 Francisova turbína (převzato z [17])

#### 2.2.5.1 Princip Francisovy turbíny

Přívod vody je realizován přívodním potrubím pro velké stroje, případně se lze setkat s umístěním v kašně u malých strojů v malých vodních elektrárnách [2, 3, 13]. Voda je k turbíně vedena přes rozvaděč, který je konstruován podobně jako u Kaplanovy turbíny [2, 3, 13]. Rozváděcí lopatky jsou otočné a umožňují regulaci průtoku a zároveň usměrňují průtok vody [2, 3, 13]. Poté voda vstupuje do oběžného kola, kde dojde k předání energie a po průchodu oběžným kolem odtéká voda savkou, která stejně jako u Kaplanovy turbíny slouží k využití zbytkové energie [2, 3, 13].

#### 2.2.5.2 Konstrukční provedení a regulace

Oběžné kolo má pevné lopatky, které neumožňují regulaci [2, 3]. Konstrukčně lze však přizpůsobit provedení turbíny velkému rozsahu rychloběžnosti [2, 3]. Takto lze

navrhnout turbínu s vysokou účinností, ale vždy jen pro optimální spád a průtok, při změně těchto parametrů přichází turbína o účinnost [2, 3]. Oběžné kolo je tvořeno nábojem, lopatkami, které jsou na náboji, a vnějším věncem, který spojuje konce lopatek [2, 3]. Lopatky jsou tvořeny z ocelového plechu a do věnce i náboje jsou zapuštěny a přivařeny [2]. Lze také odlít celé oběžné kolo v jednom kuse [2]. Tvar lopatek je závislý na rychloběžnosti [2].

Turbína je umístěna uvnitř regulátoru [3]. Horní válcová plocha náboje a dolní válcová plocha věnce tvoří společně s plochami horního a dolního víka regulátoru těsnící spáry pro snížení objemových ztrát [3]. Náboj disponuje odlehčovacími otvory [3]. Rozváděcí kruh má 20 až 24 lopatek a je ovládán automatickým regulátorem a umožňuje úplné uzavření přívodu vody [2].

Francisova turbína může být dle polohy hřídele konstruována jako horizontální nebo vertikální [1–3]. Turbínu lze využít také v reverzibilním provozu v přečerpávacích vodních elektrárnách [1–3].

### 2.2.6 Bánkiho turbína

Návrh řešení se datuje do roku 1903 a jeho autorem je australský inženýr A. G. M. Mitchel [3]. Pro Mitchelovo řešení poté v letech 1912 až 1919 vypracoval maďarský profesor Bánki teorii [3]. Bánkiho turbína je rovnotlaká a její specifickou vlastností je dvojnásobný průtok oběžným kolem [2, 3, 13]. Bánkiho turbíny jsou konstruovány pro velký rozsah výkonů od 1 kW až do 1000 kW [2, 13]. Turbína pracuje na spádech od 1,5 m do 200 m, při průtocích od  $0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  do  $9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  [2, 13].



Obr.: 2.11 Bánkiho turbína (převzato z [18])

### 2.2.6.1 Princip Bánkiho turbíny

Voda je k turbíně přiváděna pomocí vtokového dílu s obdélníkovým průřezem [2, 3, 13]. Z vtokového dílu voda vstupuje do horní části lopatek oběžného kola, následně protéká středem kola a opět přes oběžné lopatky vytéká ven směrem do výstupního členu [2, 3, 13]. První z průtoků je dostředivý a druhý průtok je odstředivý. V teorii se oba průtoky považují za rovnotlaké, nicméně při prvním průtoku má voda také tlakovou energii [3].

### 2.2.6.2 Konstrukční provedení

Oběžné kolo turbíny je složeno z pevných lopatek na konci spojených dvojicí kruhů [2, 3, 13]. V případě dlouhých lopatek může být spojovacích kruhů více, často bývá oběžné kolo a s ním i regulační orgán dělen na třetiny [2, 3]. Oběžné kolo je uloženo horizontálně, dle jeho osy rotace [2, 3, 13]. Oběžné kolo turbíny je umístěno v plechovém, či litinovém krytu, který tvoří turbínovou komoru a zároveň slouží jako nosná konstrukce pro turbínová ložiska [2]. Regulace průtoku je zajištěna klapkou, případně vložením regulačního segmentu těsně před vstup do oběžného kola [2, 3]. Jako výtokový objekt slouží buď odpadní kanál, nebo lze pro využití celého spádu použít savku, v takovém případě je kryt opatřen zavzdušňovacím ventilem a savkou proudí směs vody a vzduchu [2, 3].

## 2.2.7 TURGO turbína

Řešení TURGO turbíny pochází od E. Crewdsona z roku 1920 [12]. Turbína je principiálně rovnotlaká [12]. s turbínou se nelze v praxi setkat tak často, své využití najde zejména tam, kde se rozhoduje mezi použitím Francisovy nebo Peltonovy turbíny [12]. TURGO turbína je velmi podobná Peltonově, a při zachování předností Peltonovy turbíny umožňuje dosáhnout vyšších měrných otáček [12]. Oproti Peltonově turbíně je technologicky jednodušší. TURGO turbíny jsou konstruovány do maximálního výkonu 8 MW [12].



Obr.: 2.12 TURGO turbína (převzato z [19])

### 2.2.7.1 Princip TURGO turbíny

Voda je přiváděna k turbíně potrubím, které je zakončeno dýzou s regulační jehlou [3, 12]. Z dýzy paprsek vystupuje pod úhlem k rovině otáčení oběžného kola a vstupuje do oběžného kola z jedné strany a poté voda volně vytéká z druhé strany lopatky [12]. Voda poté odtéká do odpadního potrubí [12].

### 2.2.7.2 Konstrukční provedení

Oběžné kolo je tvořeno nábojem, dále soustavou korečkových lopatek, které jsou na vnějších koncích spojeny obvodovým věncem [12]. Korečkové lopatky mají úzkou vstupní hranu a širokou hranu výstupní, takže se může vodní paprsek po lopatce rozlít [12]. Úhel odklonu paprsku od roviny turbíny je volen v rozmezí  $18^\circ$  až  $23^\circ$ , nejčastěji  $20^\circ$  [12]. Protože paprsek vstupuje do turbíny ze strany, působí na turbínu i axiální síly mimo osu otáčení [12].

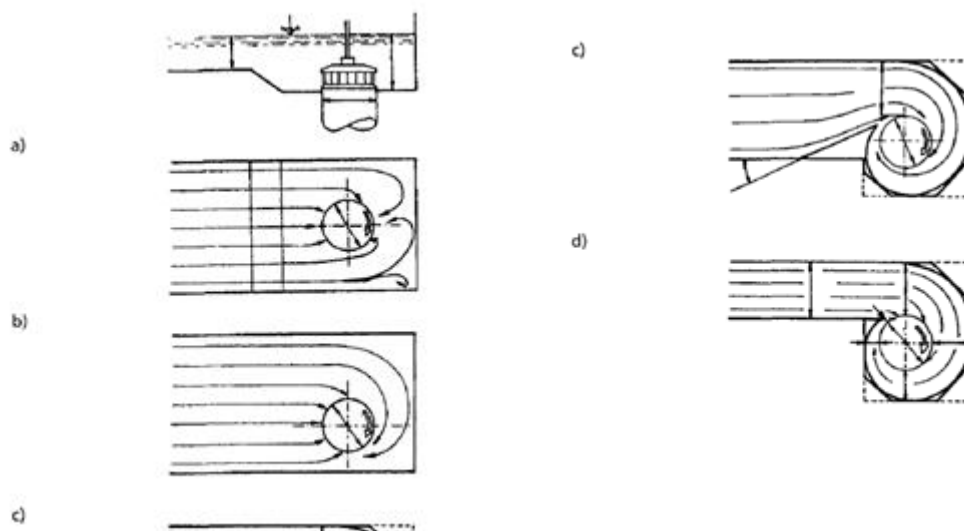
### 2.2.8 Součásti turbín

Principiálně složitější přetlakové turbíny ke své činnosti potřebují doplnění o strojní součásti jako například: kašny a spirály, uzávěry, savky, regulátory, převody [2]. Z uvedených součástí využívají rovnotlaké turbíny pouze uzávěry, převody a regulátory [2]. Uvedené konstrukční prvky nemusí být u turbíny vždy použity, jejich využití je dáno konstrukčním uspořádáním turbíny a parametry použitého generátoru [2].

#### 2.2.8.1 Kašny a spirály

Účelem kašny, či spirály je rovnoměrná distribuce vody po obvodu oběžného kola turbíny [2]. Kašna je historicky starší variantou přívodu vody a najde využití u malých strojů s průměrem oběžného kola do 1,2 m při spádech do 6 m [2]. První kašny byly konstruovány jako odkryté [2]. Oběžné kolo turbíny bylo umístěno uprostřed kašny, což způsobovalo víření vody [2]. Pro zlepšení efektivity byly další generace kašen konstruovány s excentrickým umístěním turbíny a vyplněním koutů kašny [2]. Taková kašna při pohledu shora připomínala tvarem spirálu [2]. Díky tomuto uspořádání vznikal pouze jeden vír, který se postupně svažuje k turbíně [2]. Postupný vývoj kašen je vidět na obrázku 2.13.

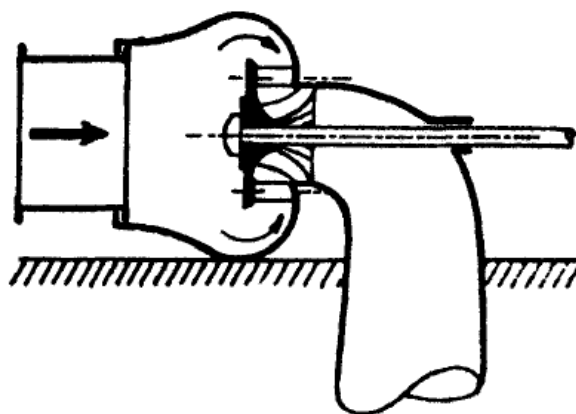




Obr.: 2.13 Postupný vývoj kašen (převzato z [2])

Odkryté kašny jsou závislé na spádu turbíny a při velkých spádech musí být velmi hluboké, a proto se pro vyšší spády začaly používat kryté kašny, které zaznamenaly podobný vývoj k excentrickému uspořádání [2].

Pro malé stroje lze také použít kotlový přívod vody, zejména u horizontálního uspořádání. Kotlový přívod je kovový [2].



Obr.: 2.14 Kotlový přívod (převzato z [2])

Modernějším přístupem je použití spirálového přívodu [2]. Spirála může být betonová, nebo kovová [2]. Betonová spirála se uplatní při malých spádech u vertikálního uspořádání [2]. Kovová spirála se používá pro střední a velké spády při uspořádání vertikálním i horizontálním [2]. Spirála je charakteristická plynulým zmenšováním plochy příčného průřezu od vstupní části až po ukončení spirály [2]. Spirála může oběžné kolo

obepínat částečně, nebo úplně [2]. Betonová spirála má v průřezu lichoběžníkový tvar [2]. Spirály kovové mají průřez zpravidla kruhový [2].

### 2.2.8.2 Savky

Savka slouží k efektivnímu odvodu vody od oběžného kola. Zároveň umožňuje využití hrubého spádu (rozdílu horní a dolní hladiny vody). Používají se u přetlakových vodních turbín [2]. Savka umožňuje umístění oběžného kola nad i pod hladinu dolní vody. Pokud je oběžné kolo umístěno pod hladinou dolní vody zvětšuje se tlak před i za oběžným kolem a savka plní funkci využití kinetické energie vodního proudu, který odtéká od oběžného kola [2]. Toho se využívá u rychloběžných turbín, kdy vystupující voda má dostatečnou rychlost [2]. Například u rychloběžné Kaplanovy turbíny může tato energie tvořit až 40 % celkové energie [2]. Savka je konstruována tak, že se s délkou postupně zvětšuje průměr, což snižuje rychlost vytékající vody na konci savky [2]. Pokud by se savka rozšiřovala příliš rychle, došlo by k odtržení vodního proudu od stěn a profil savky by tak nebyl využit [2]. Typický úhel rozšíření vzhledem k ose savky je  $6^\circ$  [2]. Savka může být přímá kuželová, nebo kolenová [2].

### 2.2.8.3 Uzávěry vtoku a přivaděčů

Uzávěry se používají na vtocích turbín, na přivaděčích a na vstupech do odběrných objektů. Uzávěry umístěné v turbínovém vtoku mohou zvyšovat hydraulické ztráty [2]. Voda protéká turbínou rotačně a vlastnosti tohoto pohybu se přenášejí i do prostoru vtoku [2]. Místo uzávěru ve vtoku do turbíny lze použít uzavíratelný rozvaděč [2]. Řešení s uzavíratelným rozvaděčem zkracuje nátokovou část a zmenšuje strojovnu turbíny [2]. Obecně lze v přivaděčích a vtocích najít následující druhy uzávěrů: stavidlové, hradidlové, segmentové, klínové, kulové, jehlové, rozstříkovací [2].

Stavidlové uzávěry lze použít na přehrazení přivaděčů s volnou hladinou i přivaděčů tlakových [2]. Hradidlové uzávěry najdou využití jako provizorní odstavení vtoku do přivaděče, do tlakových turbín, nebo na zavření výtoku ze savky [2]. Klapkový uzávěr lze použít jako vnitřní rychlouzávěr tlakového potrubí [2]. Zatímco stavidlový uzávěr používá k uzavření vlastní váhu, klapkový uzávěr je doplněn přídatným závažím [2]. Klapkový uzávěr je často umístěn na začátku potrubí [2]. Kulový uzávěr najde využití před spirální skříní vysokotlakých turbín, či před tryskou Peltonovy turbíny [2]. Zatímco všechny

předchozí typy jsou provozovány výhradně ve stavu otevřeno nebo zavřeno, jehlové uzávěry umožňují provoz i při částečném otevření a lze je tedy použít pro regulaci průtoku [2].

#### 2.2.8.4 Regulátory

Ve velkých elektrárnách a v malých vodních elektrárnách s velkým výkonem se pro výrobu elektrické energie používají synchronní generátory. Pro výrobu proudu s konstantní frekvencí je potřeba konstantních otáček generátoru. Zvýšením odběru v síti se zvyšuje zatížení generátoru, což způsobí pokles otáček. Tento stav je nepřijatelný, a proto se používá zařízení zvané regulátor, které přivírá či otvírá lopatky rozváděcího kola, nebo jiného regulačního prvku v závislosti na změně otáček. Hlavní funkcí regulátoru je zabezpečení konstantních otáček [2]. Regulátor plní také funkci rychlouzávěru přívodu vody, což je kritické v případě výpadku v elektrické síti, kdy hrozí roztočení stroje na vysoké otáčky, což by mohlo způsobit jeho zničení důsledkem odstředivé síly [2].

Podle typu turbíny se rozlišují různé druhy regulátorů [2]. Francisovy turbíny lze regulovat rozváděcími lopatkami regulátoru a synchronním ventilem [2]. Tato dvojitá regulace umožňuje řízení otáček a zároveň regulaci tlaku vody v přívaděcí spirále a tlakovém přívaděči [2]. Regulace otáček probíhá otvíráním a zavíráním rozváděcích lopatek [2]. V případě rychlého uzavření přívaděče hrozí vznik hydraulického rázu [2]. Riziko rázu se odstraňuje synchronním ventilem [2]. Při uzavírání regulátoru se otvírá synchronní ventil na potrubí, které plní funkci odbočky od spirálové skříně do odpadu [2].

Turbíny Kaplanovy mají systém dvojitě regulace pomocí rozváděcích lopatek regulátoru a pomocí lopatek oběžného kola [2]. Vzájemným nastavením lopatek regulátoru a lopatek oběžného kola lze dosáhnout vysoké účinnosti [2].

Turbíny Peltonovy používají pro regulaci jehlový uzávěr s odklápěčem (deviátorem) paprsku, případně jehlový uzávěr v kombinaci s odřezávačem (deflektorem) [1–3]. Regulace turbíny probíhá pomocí zasouvání a vysouvání jehly v uvnitř trysky. Posunem se mění výtokový mezikruhový průřez trysky [1–3]. V případě rychlého posunu regulační jehly může vzniknout hydraulický ráz, a proto se pro rychlé odstavení používá dvojitá regulace [1–3]. V případě odstávky je odklápěč odstaven do cesty vodnímu paprsku, čímž

jej částečně, či úplně odkloní od lopatek turbíny [1–3]. Poté co je plynule tryska uzavřena, lze odklápěč odsunout [1–3].

### 2.2.8.5 Převody

Turbína s generátorem může být spojena přímo, tuhou či pružnou spojkou, nebo pomocí převodu [1, 2, 12]. Z hlediska aplikace je nejvýhodnější přímé spojení, turbína však musí dosahovat dostatečně velkých otáček. Převody se proto používají hlavně u menších strojů v malých vodních elektrárnách, kde se používají asynchronní motory ve funkci generátoru [1, 2, 12]. Můžeme rozlišovat převody s ozubenými soukolími, řemenové, či řetězové.

Převodovky s ozubenými soukolími lze nalézt ve starších malých vodních elektrárnách, často mohou být ještě dřevěné. V současnosti se používají převodovky s čelním, či kuželovým ozubením. Pokud je použita převodovka s čelním ozubením jsou hřídele turbíny a generátoru rovnoběžné, pokud je použito kuželové převodové kolo, jsou hřídele vůči sobě natočeny o  $90^\circ$  [1, 2, 12]. Kuželové převodovky umožňují i změnu směru vyvedení výkonu. Převodovky s ozubenými koly mohou dosahovat účinnosti až 97 %, účinnost však rychle klesá s opotřebením [1, 2, 12]. Největší používané převody jsou až 1:10, pro větší převody se používají vícestupňové převodovky [1, 2, 12]. Často používanou vícestupňovou převodovkou, je převodovka planetová v čelním provedení. Osy turbíny a generátoru jsou spolu rovnoběžné.

Řemenové převody jsou rozšířeným řešením z důvodu jednoduchosti, malé hlučnosti a dobré provozní spolehlivosti. Použité řemeny mohou být ploché, klínové, či ozubené [1, 2, 12]. Ploché řemeny byly historicky první používané. Ploché řemeny umožňovaly přenos energie i při různé mimoběžnosti hřídelí, čehož bylo dosaženo pomocí různě uspořádaných kladek [1, 2, 12]. Klínové řemeny jsou nástupcem řemenů plochých a umožňují přenos větších výkonů. Pokud je použitý vícenásobný převod, je třeba přesné výroby, aby měly řemeny stejné délky, jinak dojde k nerovnoměrnému opotřebování. Při provozu dochází k roztahování řemenu, proto jsou převody konstruovány s možností napínání. Ozubené jsou nejdokonalejším stupněm řemenných převodů. Dosahují účinnosti až 99 % a jsou téměř bezhlučné [1, 2, 12].

Dále lze použít řetězové převody. Výhodou řetězového převodu je přenos sil bez skluzu [1, 2, 12]. Jejich použití je omezeno na přenos výkonů z prostorů obtékaných vodou. Řetěz se za provozu vytahuje a je proto vybaven napínací kladkou. Mohou dosahovat účinnosti až 98,5 %, rychle se opotřebovávají a jsou hlučné [1, 2, 12].

### 3 Úprava stávajících modelů

Následující text popisuje výchozí stav řešených modelů vodních motorů. V kapitole jsou shrnuty nevýhody původních řešení a navrženy nové konstrukční úpravy.

#### 3.1 Model vodního kola

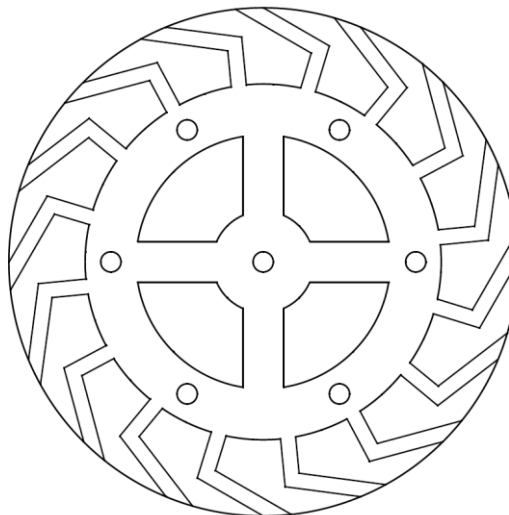
První z upravovaných modelů je vodní kolo typu horní korečník. Kolo je složeno ze dvou částí rozříznutých kolmo na osu rotace. To bylo provedeno kvůli snazšímu tisku na 3D tiskárně. Originální demonstrační model sestával ze slepeného kola zavěšeného na ocelové hřídelce, umístěného v dřevěném stojanu.



Obr.: 3.1 Původní model vodního kola

Původní provedení je vyobrazeno na obrázku 3.1 výše. Model je nezakrytý, což způsobuje rozstřík vody do okolí. Ačkoliv dřevo stojánku bylo lakované, dřevo stále pohlcovalo vodu, což vedlo ke zkroucení a ke změně průměru otvoru pro hřídel. Následné vysychání pak způsobovalo praskliny. Na sloupku je umístěn přivaděč vody ke kolu, ke kterému byla přichycena hadice s přívodem vody. Toto řešení nebylo vhodné, při velkém proudu se voda přelévala přes korečky.

Na obrázku 3.2 můžeme vidět řez navrženého vodního kola z programu AutoCAD. Navržený model má 16 lopatek. Na modelu lze dále vidět 6 otvorů pro centrovací kolíky, které sloužily ke snadnějšímu slepení součástí k sobě.



Obr.: 3.2 Návrh vodního kola

### 3.1.1 Možné úpravy vodního kola

Následující podkapitoly detailně popisují možné úpravy modelu vodního kola. Úpravy jsou směřovány k řešení vhodného uchycení a nahrazení původního dřevěného stojanu a dále vyřešení přívodu vody. Následně bude řešen způsob připojení generátoru pro vytvoření laboratorních úloh. V následujícím textu jsou modely z návrhového programu CAD, výkresy jsou předmětem přílohy B.

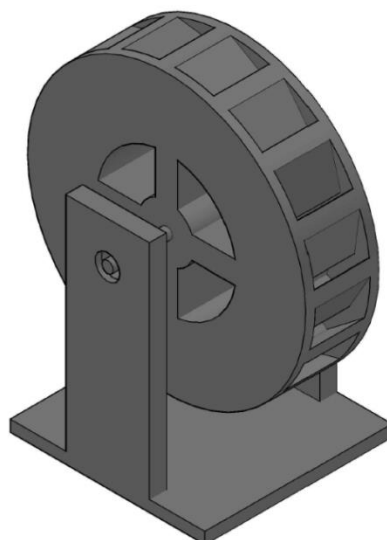
#### 3.1.1.1 Návrh uchycení

Největší slabinou modelu je jeho umístění ve dřevěném stojánku, a tím vznikající tření hřídele o dřevo. Jednou z navržených úprav je realizace nového stojánku 3D tiskem. V prvním návrhu se počítalo se stojánkem, který by umožňoval použití ložisek viz obrázek 3.3 pro minimalizaci tření vlivem otáčení. Nevýhodou tohoto řešení by byla nutnost úpravy modelu vodního kola z hřídele, která měla průměr 3,8 mm na hřídel 4 mm. Druhý návrh počítá s využitím současných hřídelí.



Obr.: 3.3 Hřídel a ložiska

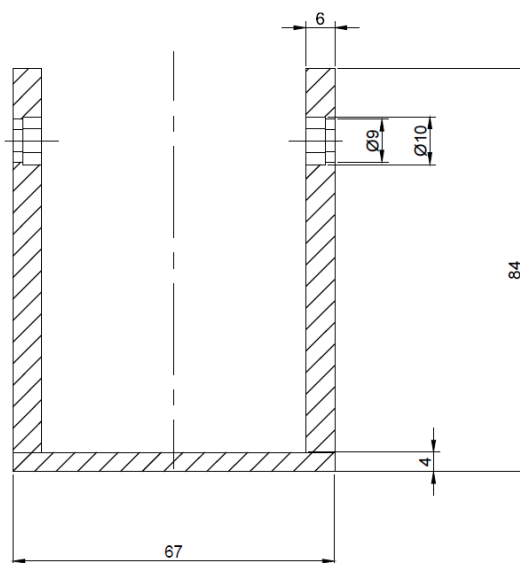
Výsledné umístění vodního kola v navrženém stojánku je vidět na obrázku 3.4.



Obr.: 3.4 Vodní kolo ve stojánku

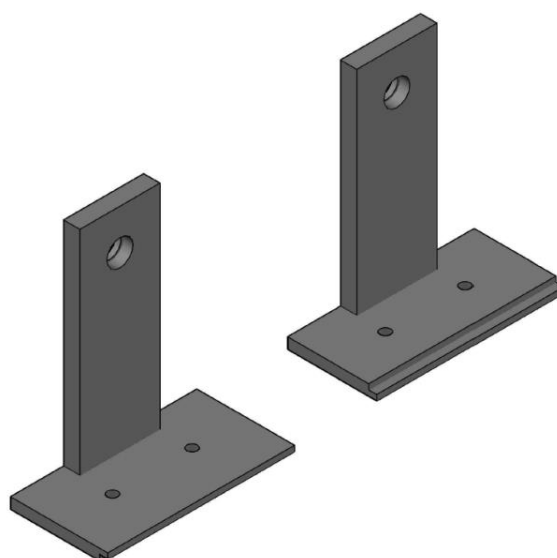


Na obrázku 3.5 níže je zobrazen řez stojánkem.



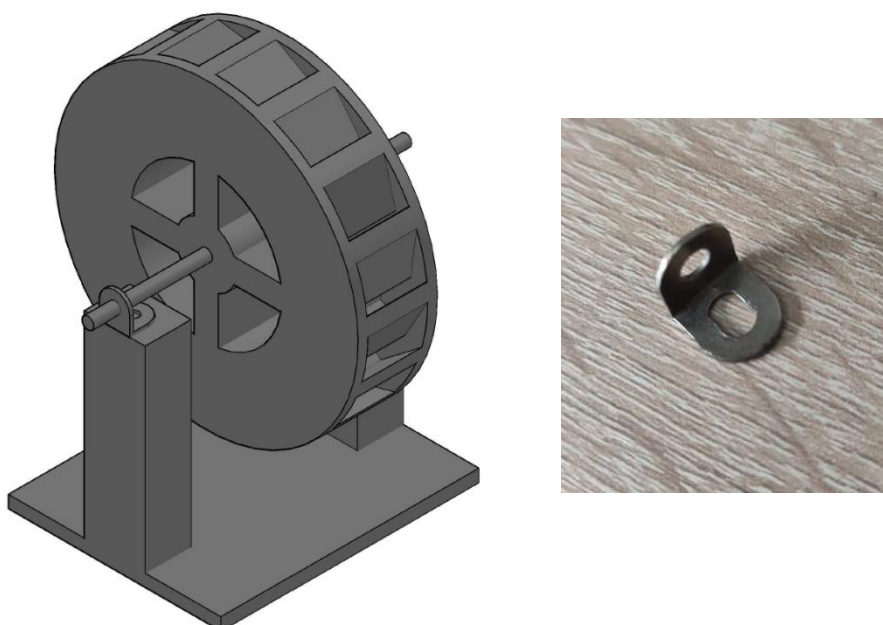
Obr.: 3.5 Řez stojánkem

Otvor pro umístění ložiska je navržený tak, aby se ložisko vložilo z vnitřní strany stojánku a vnější věnec byl zapřený o plochu vytvořenou menším průměrem na vnější straně. Pro snadné vytištění na 3D tiskárně byl model rozříznutý na dvě poloviny tak, aby největší plocha ležela na podložce. Místo rozříznutí bylo dále upraveno dvěma zuby pro snadné centrování a sestavení. Úprava pro 3D tisk je zobrazena na obrázku 3.6. Ve spodní části stojánku jsou umístěny čtyři otvory pro šrouby k uchycení stojánku k podložce.



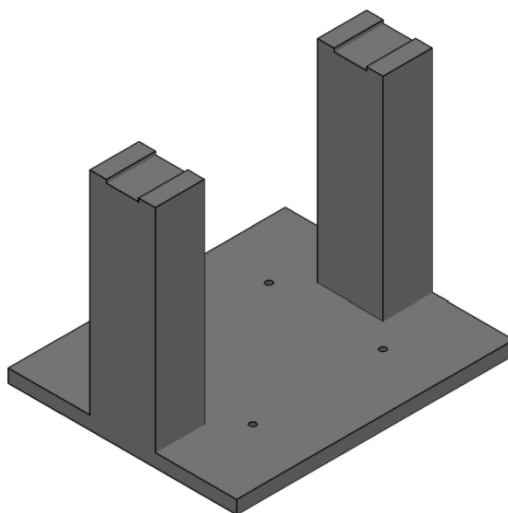
Obr. 3.6 Úprava stojánku pro tisk

Druhý navržený model stojánku, je navržen pro použití bez ložisek. Pro uchycení hřídele jsou použity ocelové profily tvaru L s otvory. Kluzný odpor ocele o ocel je téměř zanedbatelný. Ocelový profil bude na vrcholu stojánku přišroubován. Výhodou je levnější provedení bez pořizování ložisek, jednodušší konstrukce, kdy není třeba řešit upevnění ložiska a možnost použití stávajících hřídelí 3,8 mm. Nevýhodou je složitější vycentrování hřídele a navržený stojánek je tvořen větším objemem materiálu. Sloupek stojánku je navržený širší než ocelový profil, aby nedošlo k poškození vlivem roztažení šroubem. Na rozdíl od stojanu s ložisky lze tento model tisknout v pracovní poloze, protože zde není žádný otvor ve vzduchu. Návrh sestavení lze vidět na obrázku 3.7.



Obr.: 3.7 Návrh stojánku s kluzným elementem

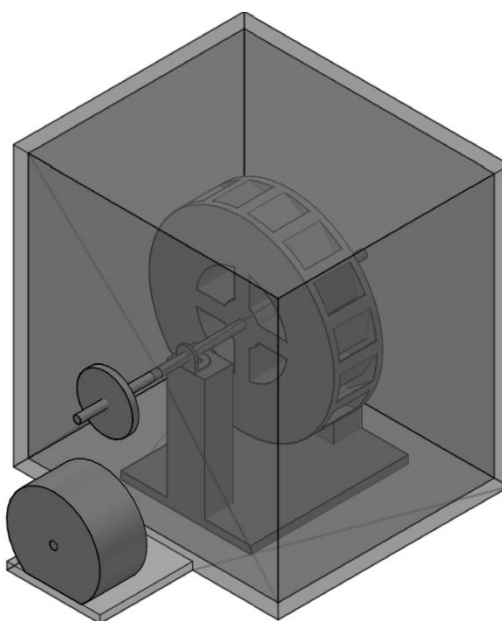
Z výše uvedených řešení bylo vybráno řešení s kluzným elementem, návrh byl dále upraven o drážky k vycentrování kovového profilu pro přichycení hřídele a dále ve spodní části byly vytvořeny čtyři díry k přišroubování stojánku do plexisklové krabice viz obr. 3.8.



Obr.: 3.8 Upravený stojánek

### 3.1.1.2 Kryt modelu

K modelu bude připojený generátor, který by měl být umístěný mimo dosah vody. Pro vodní kolo byla navržena skříňka z průhledného plexiskla, kdy mechanické otáčky vodního kola jsou hřídelem vytaženy ven ze skříňky, kde je ke hřídeli připojen generátor. Vizualizaci tohoto provedení lze vidět na obrázku 3.9 níže.

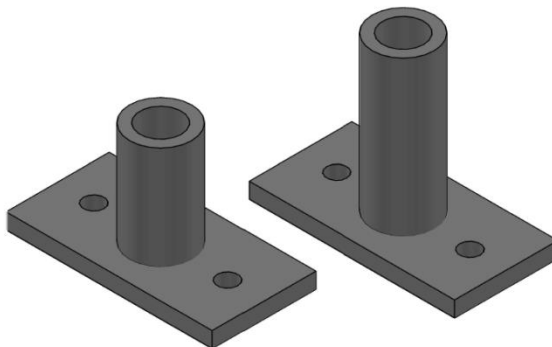


Obr.: 3.9 Uzavření modelu do skříňky

Součástí skříňky je platforma z vnějšku pro přichycení generátoru. Připojení generátoru ke hřídeli je v návrhu zobrazeno pomocí řemenného převodu do rychla.

### 3.1.1.3 Přívod vody a připojení generátoru

K vodnímu kolu bude voda přiváděna přívodovou hadicí. Hadici je třeba protáhnout do vnitřku krycí skříňky. pro skříňku vodního kola byla navržena průchodka.



Obr.: 3.10 Průchodka pro přívod vody

Průchodka, kterou můžeme vidět na obrázku 3.10, je tvořena dvěma částmi, vnější a vnitřní. Vnější, kratší část, slouží pro nasazení přívodní hadice a vnitřní část usměřňuje vodu pro vstup do korečků vodního kola. Otvory po stranách slouží pro sešroubování.

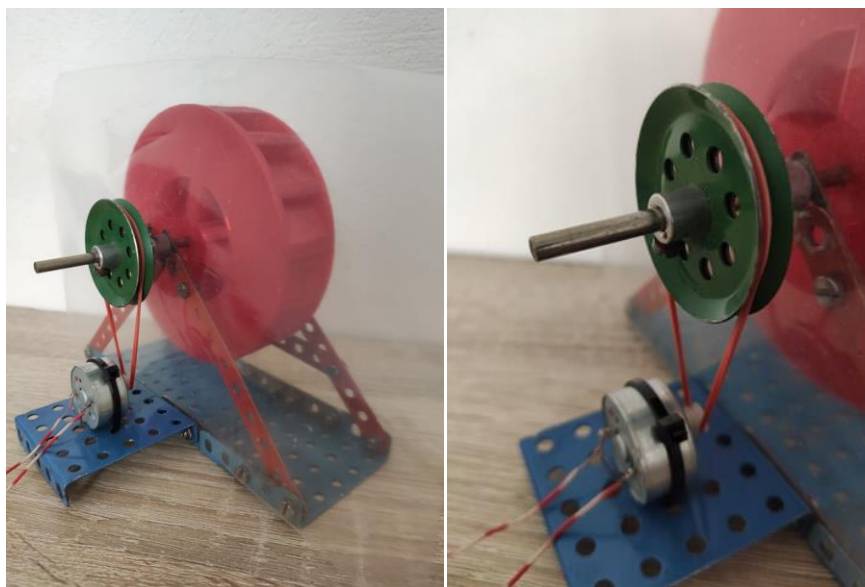
Generátor bude k hřídeli vodního kola připojen přes převod do rychla, pomocí převodového kola s řemenem. Kolo bylo navrženo pro 3D tisk a je vyobrazeno na obrázku 3.11. Díky řemennému převodu není třeba řešit centrování hřídelů. Navržené převodové kolo má ve svém objemu čtveřici otvorů pro ušetření materiálu.



Obr.: 3.11 Převodové kolo

### 3.1.2 Experimentální sestavení

Pro ověření funkce návrhu a výběru generátoru byl sestaven testovací model, jaký lze vidět na obrázku níže a dále detail připojení generátoru na obrázku 3.12.



Obr.: 3.12 Experimentální uchycení vodního kola a detail převodu

Pro připojení vodního kola bylo testováno přímé spojení běžného kola a generátoru. Pro přímé spojení byl vybrán stejnosměrný modelářský elektromotor typu MIG 280. Bohužel vodní kolo nemá dostatečný moment pro utočení tohoto motoru. Další testovaný motor, který je vidět na obrázku 3.12, pochází z CD mechaniky, kde sloužil k pohonu vysouvání mechaniky. Motorek je opatřen řemenicí. V modelu byl použit s řemenným převodem do rychla. Převod je použit, protože u vodního kola je třeba počítat s nižšími otáčkami, aby se voda vylévala z korečku volně a nebyla rozstříkována do okolí odstředivou silou. Mezi vodním kolem a generátorem je zástěna proti stříkající vodě. Pro přívod vody bylo použito čerpadlo Reich Power Pump EASY 14, které bylo napájeno laboratorním zdrojem.



Obr.: 3.13 Testování funkčnosti modelu

### 3.2 Model Peltonovy turbíny

Druhým upravovaným modelem je Peltonova turbína. Stejně jako model vodního kola, byl model Peltonovy turbíny rozříznutý na dvě poloviny, kvůli usnadnění tisku. Původní model měl stojánek totožný se stojánkem vodního kola.

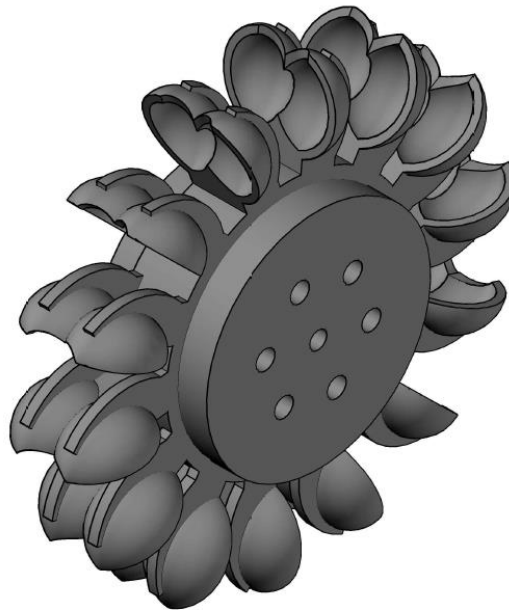


Obr.: 3.14 Původní model Peltonovy turbíny

U modelu Peltonovy turbíny vznikala stejný problém jako u vodního kola, tedy to, že ačkoliv bylo dřevo lakované, stále nasávalo vodu, což způsobovalo kroucení materiálu a následné praskání. Stojánek turbíny neměl žádný podstavec pro uchycení přívodní hadice

s tryskou a při použití modelu k demonstraci funkce se musela hadice uchycovat na kovovou svorku k podstavci.

Vytištěná Peltonova turbína má 14 lopatek a do jejího náboje bylo vytvořeno 6 odlehčovacích děr.



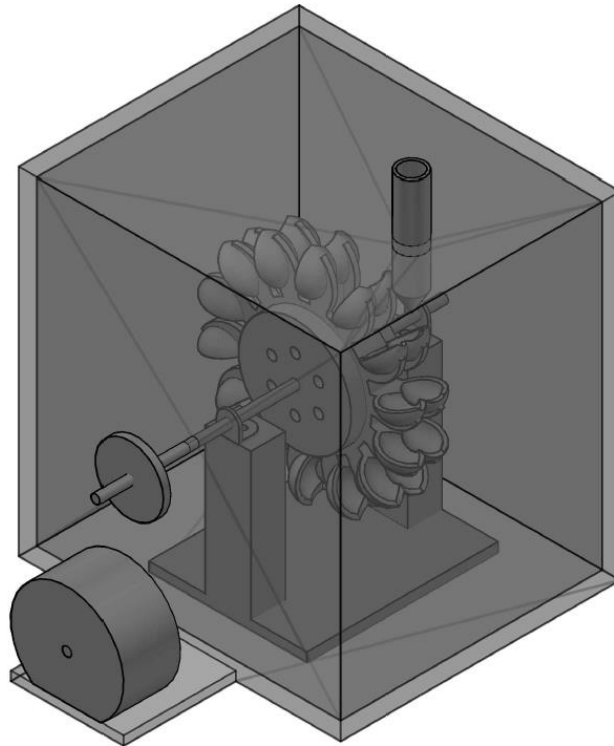
Obr.: 3.15 Model Peltonovy turbíny

### 3.2.1 Možné úpravy Peltonovy turbíny

Původní konstrukce uchycení modelu Peltonovy turbíny je podobná modelu vodního kola, a proto i následující úpravy vychází z podobné logiky. Úpravy tedy směřují k vhodnému řešení uchycení, dále k přívodu vody a připojení generátoru.

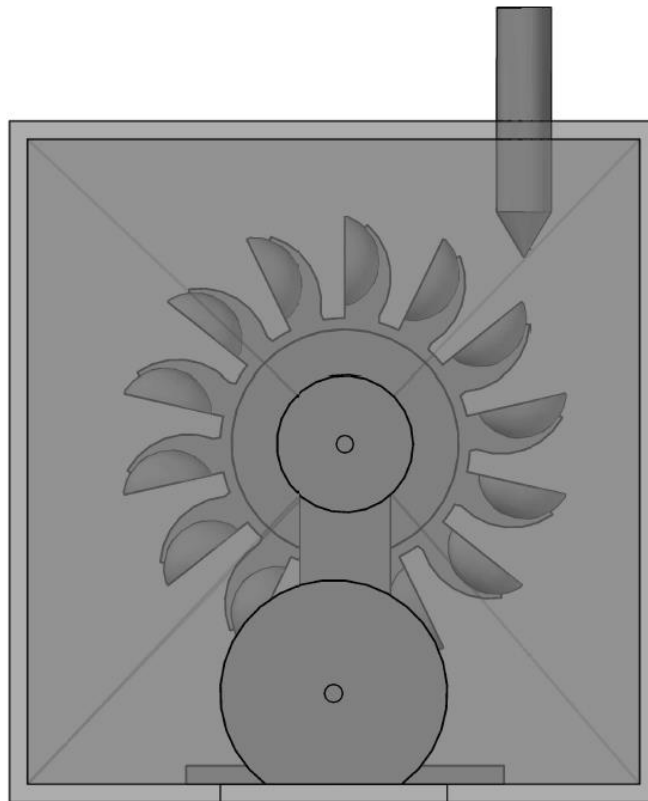
Pro Peltonovu turbínu byla navržena stejná dvojice stojanů jako pro model vodního kola. První varianta opět počítá s použitím ložisek a přechodu na použití hřídele s větším průměrem. Dalším návrhem je zjednodušená varianta s kluzným uchycením turbíny přes ocelové profily, které jsou přišroubované ke sloupům stojánku. Výkres výsledného stojanu je v příloze B a je identický se stojanem pro vodní kolo.

Pro turbínu byla navržena plexisklová krabíčka s platformou pro uchycení generátoru, jejích vizualizaci lze vidět na obrázku 3.16. Připojení generátoru je navrženo opět řemenným převodem, stejně jako u vodního kola, s použitím převodového kola dle výkresu v příloze B.



Obr.: 3.16 Umístění Peltonovy turbíny do krabíčky

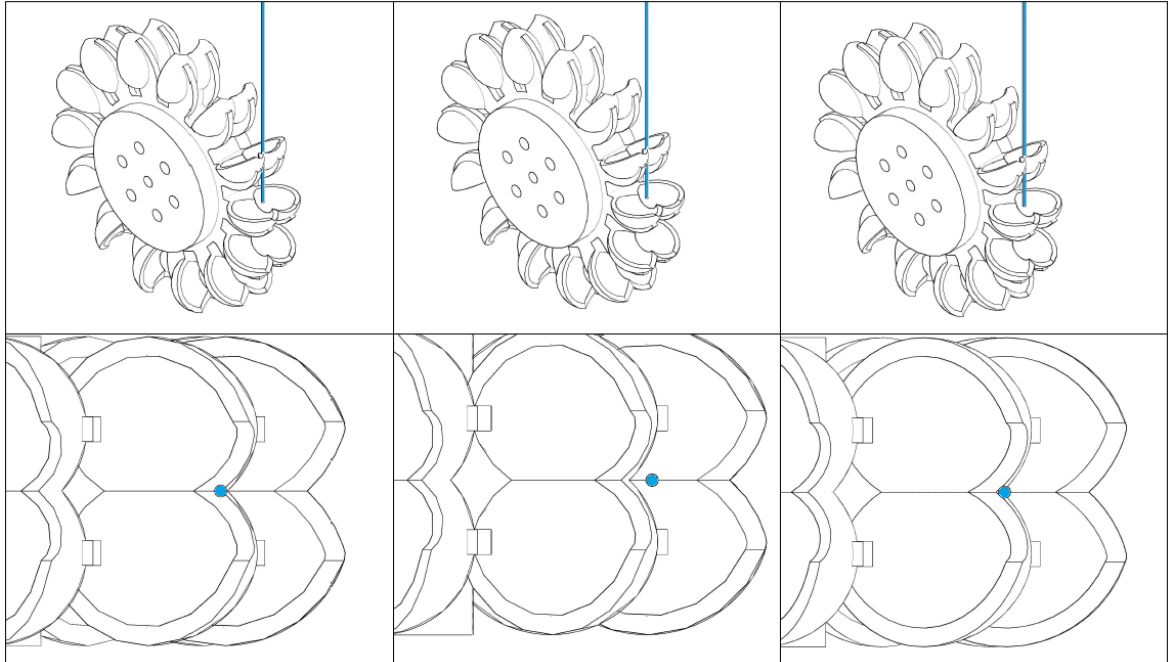




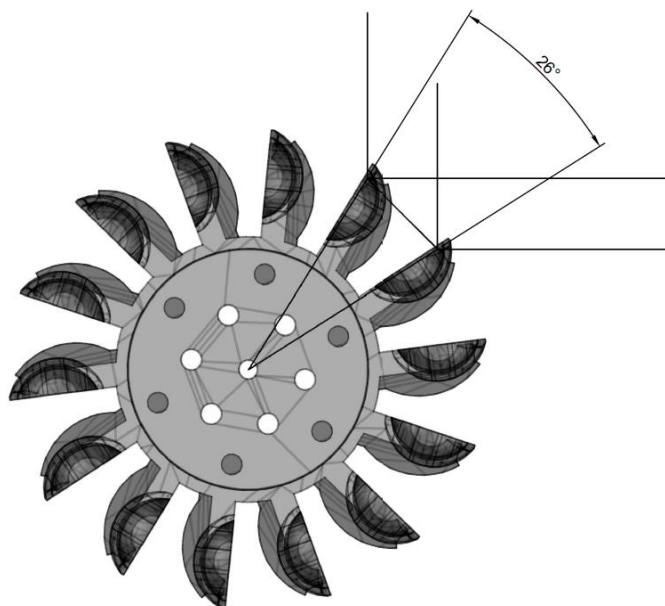
Obr.: 3.17 Umístění Peltonovy turbíny do krabičky pohled z boku

Na obrázku 3.17 je vidět realizace přívodu vody do trysky. Tryska s přívodní hadicí je uchycena do plexisklové krabice. V souvislosti s nastavením úhlu trysky vůči oběžnému kolu byla provedena simulace, jakým způsobem paprsek vstupuje do lopatky a kdy dojde k jeho odříznutí a vstupu do následující lopatky.

Obrázek 3.18 zachycuje postupný pohyb vodního paprsku od začátku bříty lopatky až po vstup do lopatky následující. Na obrázku 3.19 je vidět, že vodní paprsek setrvá na jedné lopatce po dobu otočení oběžného kola o  $26^\circ$ .



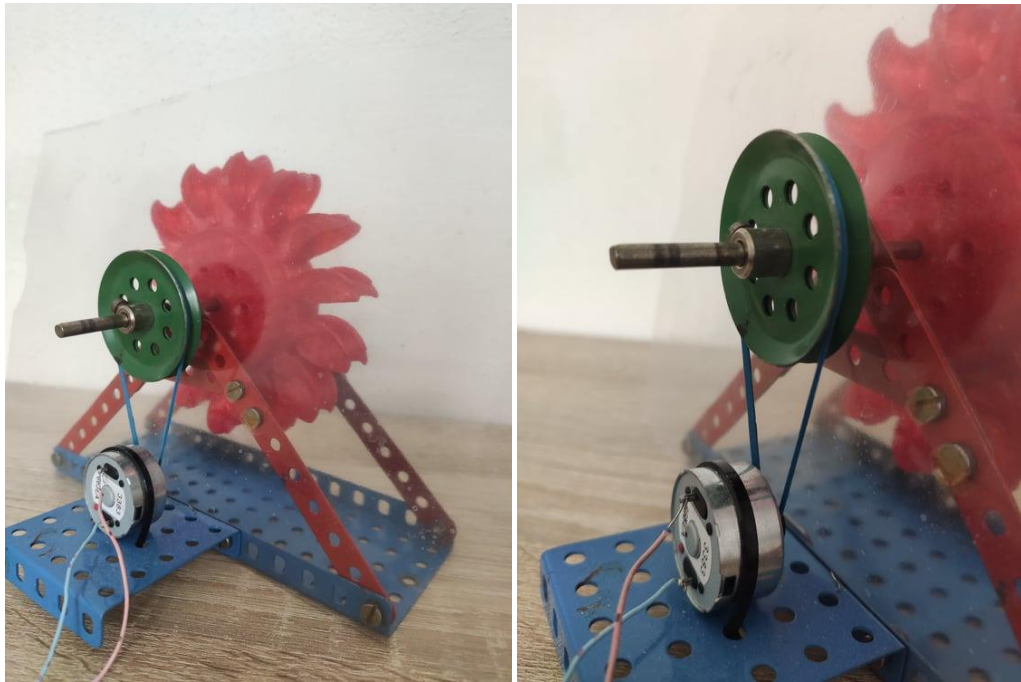
Obr.: 3.18 Vstup vodního paprsku do lopatek



Obr.: 3.19 Úhel pootočení pro vstup do další lopatky

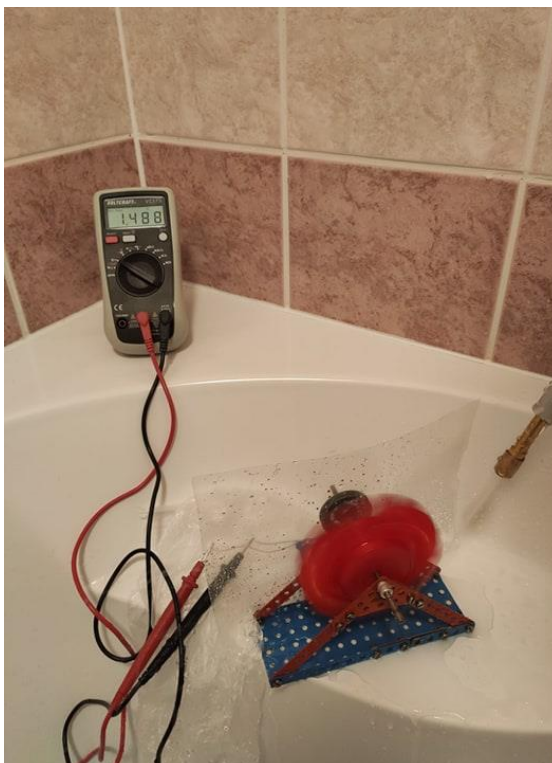
### 3.2.2 Experimentální sestavení

Funkčnost byla ověřena na testovacím modelu. Součástí ověření byl výběr vhodné trysky. Byla zkoušena tryska ze zavlažovacího systému a tryska ze zahradního postřikovače. Z této dvojice byla vybrána tryska ze zahradního postřikovače. Opět bylo zkoušeno více generátorů, nejlepší výsledky podával stejný motor jako u vodního kola, který pochází z optické mechaniky.



Obr.: 3.20 Usazení Peltonovy turbíny do stojánku

Model byl testován s výše uvedenými součástmi. Pro přívod vody je opět použito čerpadlo Reich Power Pump EASY 14. Protože je přívod zakončen tryskou, musí čerpadlo pracovat na větší výkon. Oproti vodnímu kolu dosahuje turbína vyšších otáček. Na obrázku 3.21 je vidět testování v provozu i s připojeným multimetrem měřícím svorkové napětí generátoru.



Obr.: 3.21 Měření Peltonovy turbíny

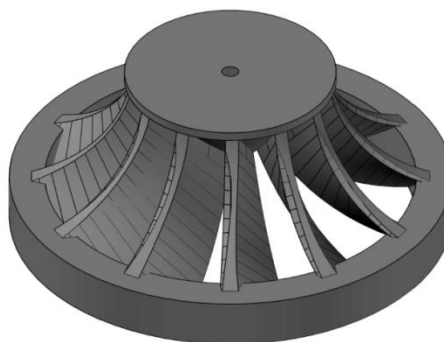
Na obrázku 3.22 je vidět fotografie ze Dnů vědy a techniky v Plzni, kde byly turbíny vystaveny jako demonstrační modely ve stánku KEE ZČU. Na obrázku je dále vidět již zmiňované uchycení přívodu vody. Odvod odpadní vody je v původních modelech řešen volným přepadem, v nové variantě s krycí krabičkou bude ve dně otvor, který bude sloužit k odvodu vody. To lze spojit s podstavcem na akváriu, takže nebude docházet k vylévání odpadní vody okolo akvária.



Obr.: 3.22 Demonstrační modely

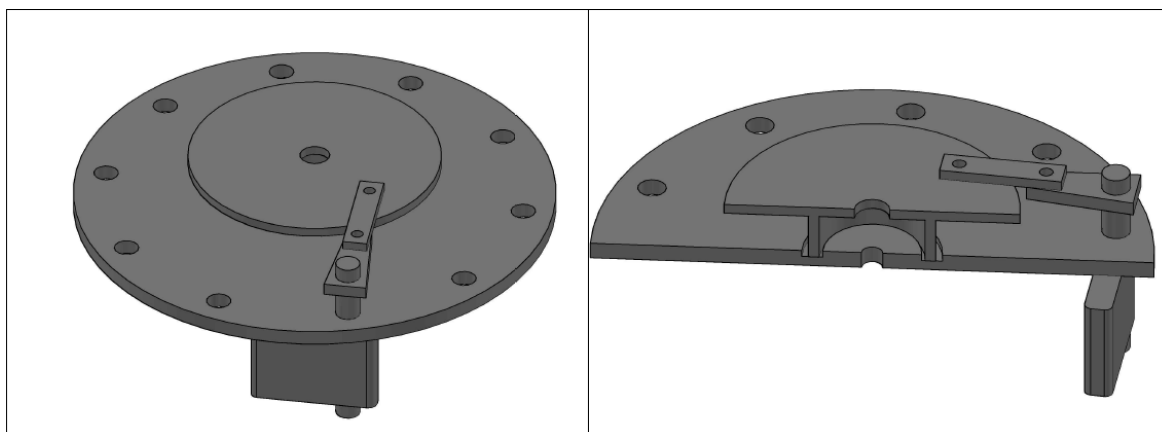
### 3.3 Model Francisovy turbíny

Původně navržená Francisova turbína má 12 lopatek. Tato turbína byla tištěna v celku, ale kvůli složitosti lopatek v některých místech lopatky nejsou vrstvy nanášeného materiálu spojené. Průměr oběžného kola u náboje je 46 mm a průměr vnějšího věnce je 100 mm.



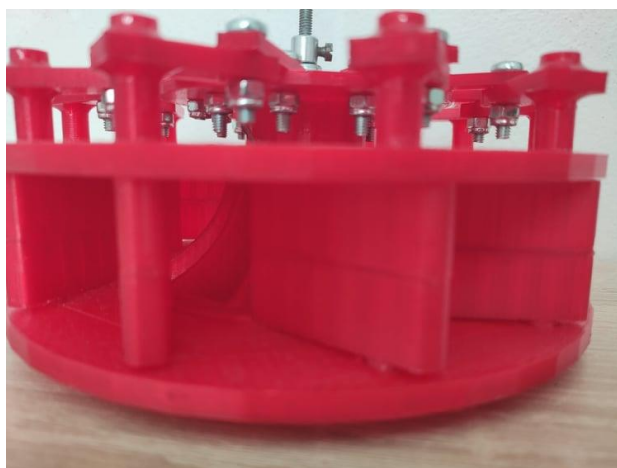
Obr.: 3.23 Model Francisovy turbíny

Společně s modelem turbíny byl navržen i regulátor s rozváděcími lopatkami, které jsou pohyblivé. Regulátor má celkem 10 lopatek a umožňují plné otevření či uzavření vtoku vody. Regulátor je tvořen horním a dolním víkem, ve kterých jsou otvory pro průchod lopatek. Lopatky jsou přes dvojici táhel připojeny k regulačnímu kruhu, který se pohybuje ve výřezu horního víka regulátoru.



Obr.: 3.24 Princip otáčení lopatek regulátoru

Na obrázku 3.24 je zobrazena jedna lopatka společně s táhly, regulačním kruhem a víkem regulátoru. V řezu na pravém obrázku lze pozorovat pohyb regulačního kruhu po horním víku regulátoru.



Obr.: 3.25 Francisova turbína usazená v regulátoru

Na obrázku výše je sestavený regulátor. Jako čepy táhel a čepy připojení k regulačnímu kruhu byly použity šrouby s matkami s protiskluzovými gumičkami. Pootočením šrouby na regulačním kole dojde k natočení lopatek. Uvnitř regulátoru

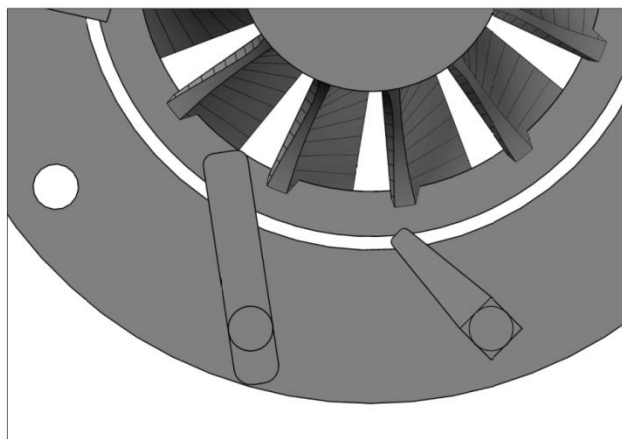
je vloženo oběžné kolo turbíny. Vnější věnec turbíny přímo navazuje na vtokovou část spodního kruhu regulátoru.

### 3.3.1 Možné úpravy Francisovy turbíny

V následujících podkapitolách budou popsány úpravy modelu Francisovy turbíny. Bude přepracován a navržen nový rozvaděč. Dále bude představeno nové oběžné kolo s vylepšeným tvarem. Úpravy budou navrženy tak, aby zůstaly v platnosti původní základní rozměry, jako průměr náboje, průměr dolního věnce a výška lopatek regulátoru.

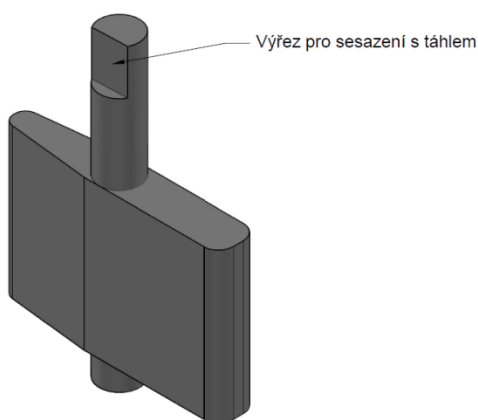
#### 3.3.1.1 Rozvaděč vody

Prvním problémem se ukázalo být špatné navržení lopatek rozvaděče. Lopatky byly příliš dlouhé v přední části a zasahovaly tak do oběžného kola. Navrhovaná úprava je zkrácení lopatky v přední části. Na obrázku 3.26 můžeme vidět původní návrh lopatky (levá lopatka) a zkrácenou verzi lopatky (pravá lopatka), které jsou posunuty o úhel  $45^\circ$  od úplného uzavření rozvaděče. Zkrácením lopatky vyvstal problém s kompletním uzavřením rozvaděče, kvůli kterému by bylo nutné změnit počet lopatek z 10 na 12, aby se rozvaděč dal kompletně uzavřít. Zvětšením počtu lopatek by však nastal problém s prostorem na horním víku regulátoru, kde by se překrývaly táhla a nebylo by možné jimi pohybovat. Byl proto proveden kompletní návrh nového rozvaděče, jenž konstrukčně vychází z původního. V následujícím textu budou vykresleny modely jednotlivých částí, konstrukční výkresy budou součástí přílohy C.



Obr.: 3.26 Ukázka rozdílu zásahu lopatky do oběžného kola

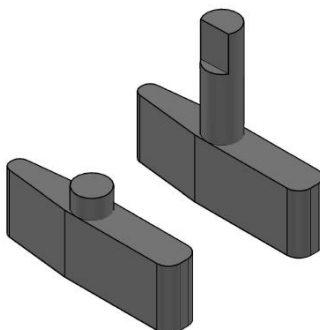
Pro regulátor byla navržena nová geometrie lopatky. Lopatka je umístěna na čepu, jež prochází do dolního i horního víka regulátoru, ve kterých je lopatka uchycena.



Obr.: 3.27 Nový návrh lopatky

Na horní části čepu lopatky je provedeno seříznutí, které slouží k sestavení lopatky s táhlem pro její ovládání. V původním návrhu byl čep kulatý a bylo nutné nastavit správnou polohu táhel a následně slepit dohromady. Přední část lopatky je zúžena. Regulační soustavu tvoří 10 lopatek.

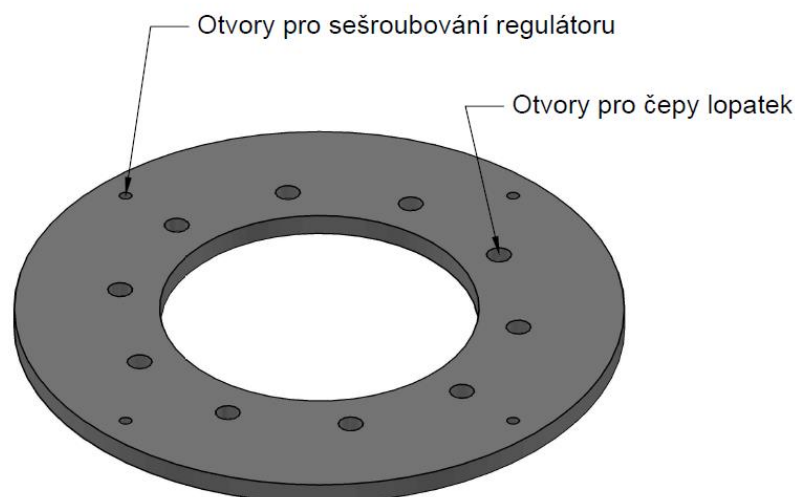
Výška samotné lopatky je 30 mm, její délka je 45 mm. Celková výška i s čepem je 60 mm. Výřez je udělaný 9 mm od horní části čepu. Kompletní geometrie je v příloze C. Pro vytisknutí na 3D tiskárně bylo třeba lopatku upravit tak, aby se žádná část netiskla ve vzduchu. Úprava byla provedena rozříznutím lopatky napůl viz obrázek 3.28.



Obr.: 3.28 Rozříznuté lopatky



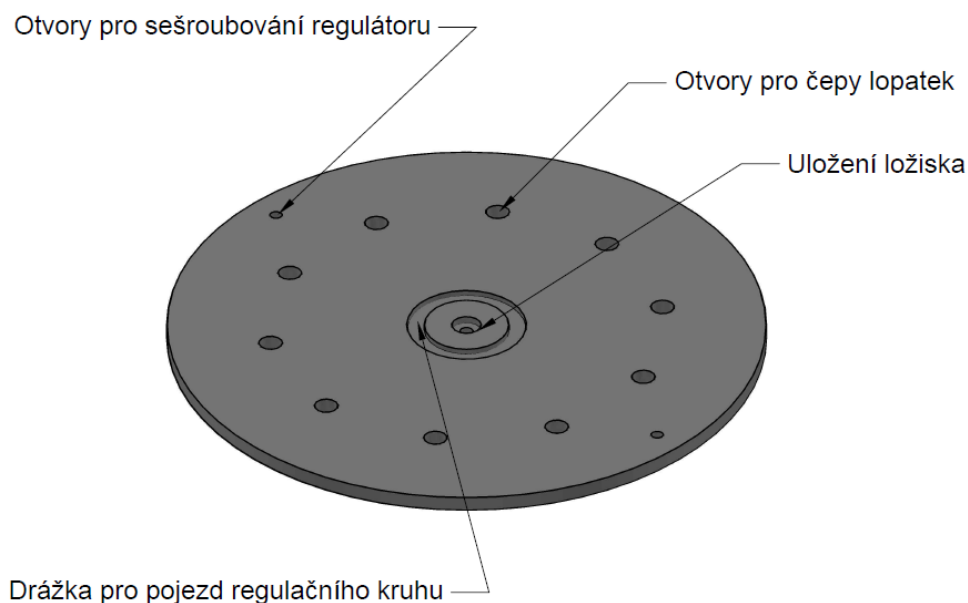
Na základě rozměrů lopatek a na základě průměru původního oběžného kola (kvůli zachování původních rozměrů) byl navržen nový spodní kruh regulátoru.



Obr.: 3.29 Spodní víko regulátoru

Na obrázku 3.29 je znázorněn návrh nového spodního víka regulátoru. U vnitřní strany je 10 otvorů, které slouží pro uchycení čepů lopatek. V původním návrhu byly čepy lopatek protaženy skrz celou tloušťku kruhu, v novém návrhu jsou pouze zapuštěny do objemu víka. Poloha otvorů pro čepy byla navrhována tak, aby při otevření lopatek nedošlo k jejich přesahu do oběžného kola a naopak při zavření lopatek, aby se o sebe lopatky zapřely a tím došlo ke kompletnímu uzavření. Oproti původnímu víku byl zvětšen vnější průměr a byla přidána čtveřice otvorů. Dva z těchto otvorů korespondují s otvory v horním kruhu a slouží k sešroubování regulátoru například pomocí šrouboviny. Druhé dva otvory pak slouží k uchycení regulátoru k podkladu.

V návaznosti na dolní víko bylo navrženo horní víko regulátoru viz obr. 3.30. Oproti původnímu víku byl opět zvětšen vnější průměr a byla doplněna dvojice otvorů pro sešroubování. Dále jsou v horním víku otvory pro průchod čepu lopatek. Dalším prvkem horního víka je drážka, ve které se pohybuje regulační kruh. Drážka regulační kruh fixuje na místě. Uprostřed víka je otvor pro ucpávku hřídele, a zároveň je vytvořen prostor pro uložení ložiska.



Obr.: 3.30 Horní víko regulátoru

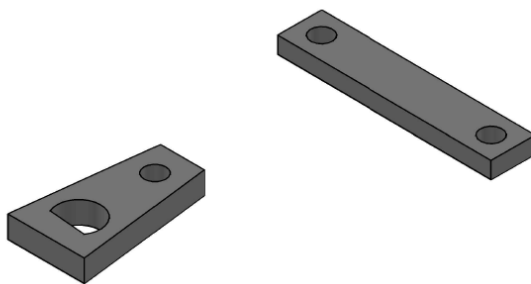
Byla navržena nová táhla lopatek. U původního regulátoru bylo potřeba pootočení regulačního kruhu o velký úhel k otevření lopatek, čímž docházelo k jejich protočení a následnému zablokování regulátoru, což lze vidět na obrázku 3.31.



Obr.: 3.31 Původní víko s protočenou lopatkou

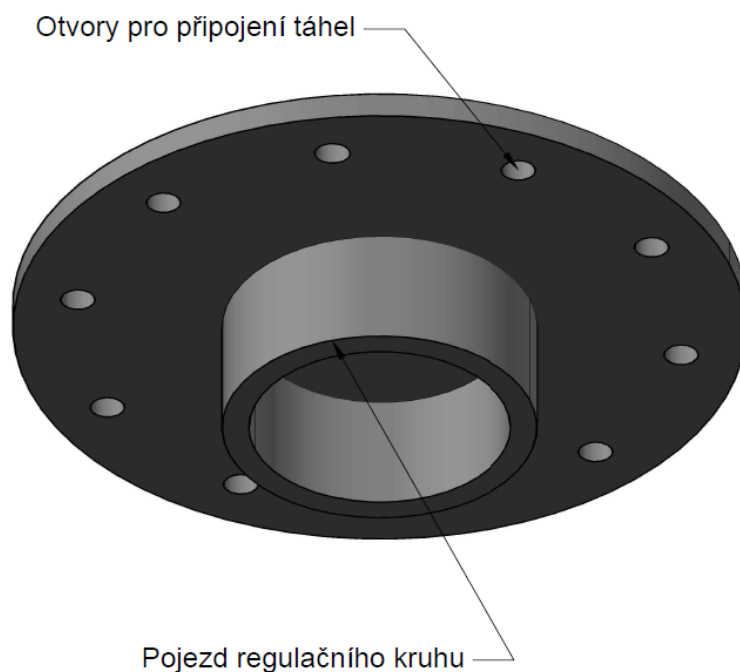
Byl změněn poměr délek táhel, díky čemuž není potřeba tak velký úhel k dosažení plného otevření nebo uzavření. Zároveň v krajních polohách nedochází k rovnoběžnosti

os lopatek, při které dochází k protočení. Táhlo s otvorem pro čep lopatky má půlměsíkový otvor pro sesazení a jednoduché nastavení polohy vůči lopatce.



Obr.: 3.32 Táhla lopatek

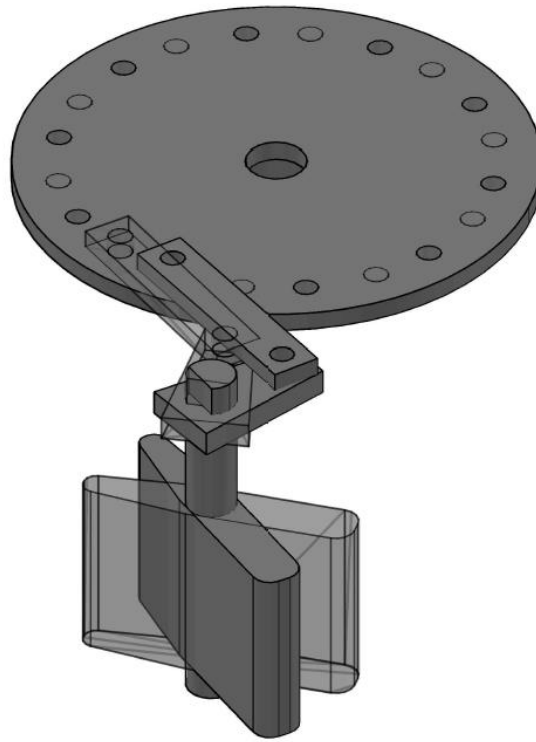
Poslední součástí je regulační kruh, jehož pohybem dochází přes táhla k otáčení lopatek. Rozměry jsou navrženy tak, aby při malém otočení došlo k plnému otevření lopatek.



Obr.: 3.33 Regulační kruh

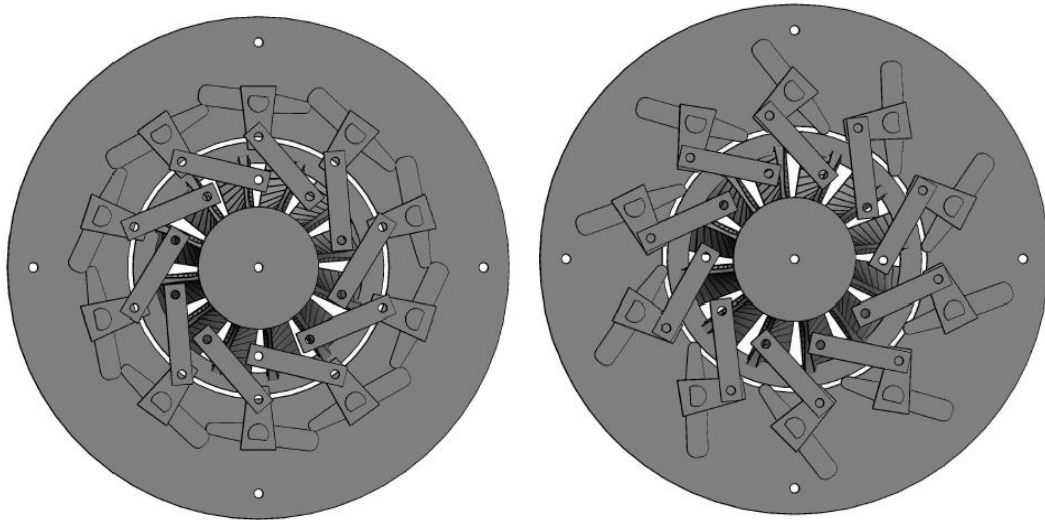
Po obvodu regulačního kruhu jsou otvory pro připojení táhel. Ve spodní části regulačního kruhu je válcové mezikruží, které zapadá do drážky v horním víku regulátoru.

Obrázek 3.34 znázorňuje krajní polohy lopatek. Plná lopatka ukazuje polohu úplného otevření regulátoru a zprůhledněná lopatka vyobrazuje uzavření. K otočení dochází posunem regulačního kruhu a následně přenesením pohybu přes dvojici táhel na čep lopatky.



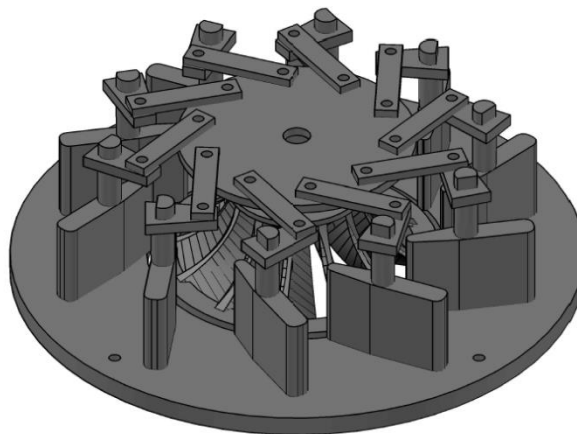
Obr.: 3.34 Princip regulace

Na následujících obrázcích je pohled shora na soustavu lopatek, usazených ve spodním víku. V soustavě je dále vloženo oběžné kolo. První z obrázků ukazuje uzavřený regulátor a zapření lopatek o sebe. Druhý obrázek zobrazuje otevřené lopatky.



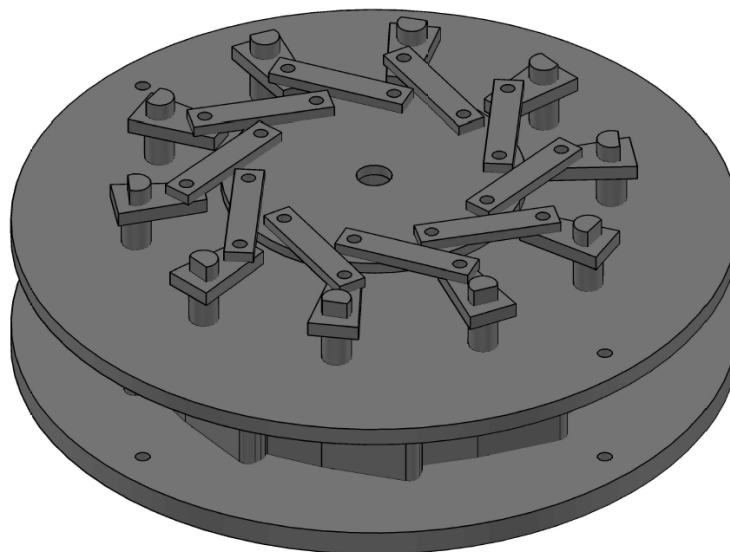
Obr.: 3.35 Pohled shora na uzavřené a otevřené lopatky

Dále je vykreslen pohled na sestavený regulátor s odstraněným horním víkem. Lopatky jsou v otevřené poloze.



Obr.: 3.36 Otevřené lopatky regulátoru

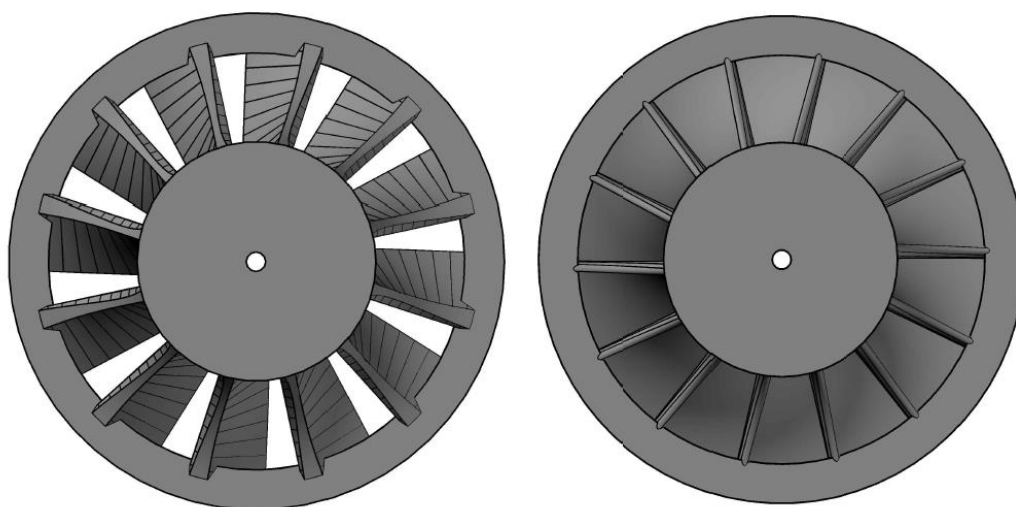
Nakonec byl vykreslen pohled na celý regulátor.



Obr.: 3.37 Kompletní regulační kolo

### 3.3.1.2 Oběžné kolo

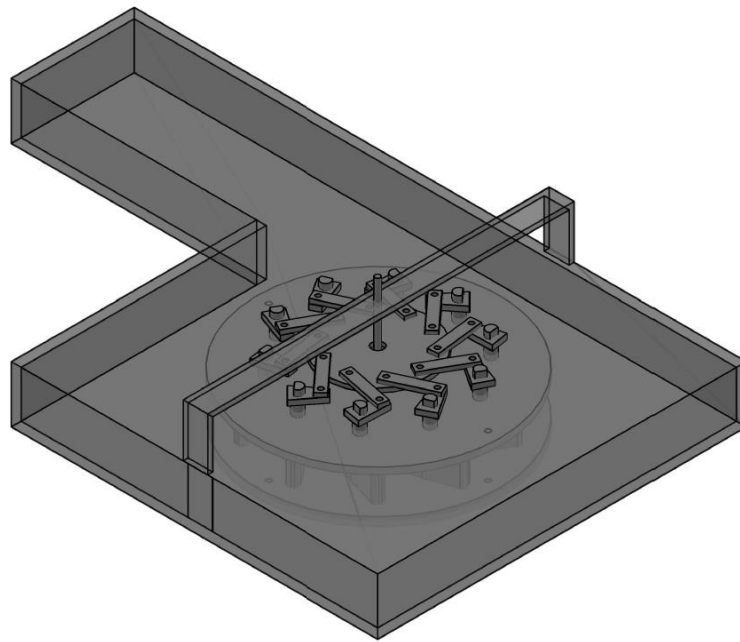
Původní oběžné kolo je tvořeno 12 lopatkami. Při pohledu shora je lopatková síť částečně průhledná. Pro nové oběžné kolo byly navrženy širší lopatky, které v dolní části přesahují pod začátek lopatky následující. Tím došlo k vyplnění lopatkové sítě. U nového oběžného kola byl zvýšen počet lopatek na 14. Hlavní rozměry zůstaly zachovány a výkresy jsou k nahlédnutí v příloze C. Vlevo na obrázku 3.38 můžeme vidět původní oběžné kolo a vpravo návrh nového oběžného kola.



Obr.: 3.38 Rozdíl mezi původním a novým oběžným kolem Francisovy turbíny

### 3.3.1.3 Návrh kašny

Výše představený regulátor je navržený pro umístění v kašně. Kašnu lze vytvořit z plexiskla. Kašna je zakrytá tak, aby regulační prvek rozvaděče byl mimo dosah vody. Hřídel je vyvedena přes ucpávku ve víku regulátoru a je uchycena v ložisku, které je umístěno na nosníku nad kašnou. Kašna je čtvercová, pro zlepšení přívodu vody je možné rohy zakrýt, čímž se omezí víření vody. Návrh kašny je na obrázku 3.39.



Obr.: 3.39 Kašna k rozváděcímu kolu

## 4 Návrh laboratorních úloh

V následující kapitole budou vytvořeny a popsány návrhy laboratorních úloh. Úlohy jsou připraveny pro vodní kolo a Peltonovu turbínu. Model Francisovy turbíny vyžaduje pro provoz velký objem vody (ke zkoušce provozu bylo použito zahradní čerpadlo s výkonem 400 W), což je v laboratorních prostorech složité obstarat, a tak slouží spíše k demonstračním účelům uspořádání strojních součástí turbíny. Kapitola popisuje jednotlivé úkoly, postup měření a výstupy, vzorový laboratorní protokol je pak uveden v přílohách D a E. Modely jsou poháněny čerpadly, rozdílným napájením čerpadel jsou simulovány podmínky vodního toku.

### 4.1 Vodní kolo

Úloha s vodním kolem je navržena jako hledání optimální provozní polohy a následného výpočtu základních parametrů. Kolo by mělo být provozováno tak, aby mohla voda plynule opouštět korečky vodního kola, a zároveň aby byla schopna vodní kolo plynule pohánět. Prvním úkolem je nalézt tento optimální bod.

#### 4.1.1 Pracovní bod vodního kola

Čerpadlo je napájeno laboratorním zdrojem a postupně je zvyšováno jeho napětí, čímž se zvyšuje průtok vody. Zároveň se zvyšují otáčky vodního kola. Po dosažení otáček, při kterých se voda ještě stihá vylévat bez rozstříkávání, je odečteno napětí čerpadla. Měření probíhá s generátorem naprázdno. Ze znalosti pracovního bodu čerpadla lze dalším měřením zjistit parametry vodního toku. Při vzorovém měření bylo jako ideální pracovní bod určeno napětí čerpadla  $U=6,3$  V.

#### 4.1.2 Výpočet parametrů vodního toku

V pracovním bodě čerpadla lze určit průtok. Měření průtoku probíhá tak, že je měřen čas, za který bude přečerpáno předem určené množství vody. Měření lze realizovat například odměrnými nádobami. Ve vzorovém měření byl přečerpávám objem vody 0,5 l. Po zapnutí čerpadla byly zároveň spuštěny stopky a byl měřen čas potřebný k přečerpání. Voda byla přečerpána za 6,9 s. Průtok v pracovním bodě lze určit dle rovnice:



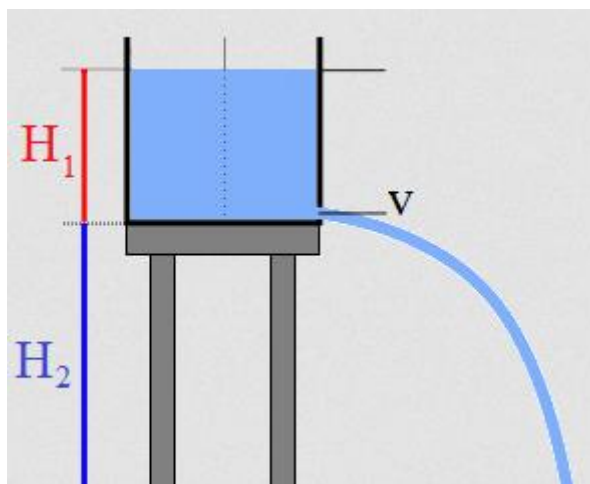
$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,0005}{6,9} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \quad (4.1)$$

Za předpokladu homogenního rozložení rychlosti v průřezu lze určit výtokovou rychlost z rovnice:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{7,2 \cdot 10^{-5}}{\pi 0,00475^2} = 1,02 \text{ m/s} \quad (4.2)$$

V rovnici 4.2 se vyskytuje průřez průtoku, je tedy třeba změřit poloměr výtokového profilu. Ze znalosti rychlosti lze určit ekvivalentní výšku sloupce vody, který by v případě otvoru pod hladinou vody způsobil danou rychlost, jinak řečeno lze vypočítat spád, který čerpadlo simuluje:

$$H_1 = \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{1,02^2}{2 \cdot 9,81} = 0,05 \text{ m} \quad (4.3)$$



Obr.: 4.1 Výpočet spádu výtokové rychlosti

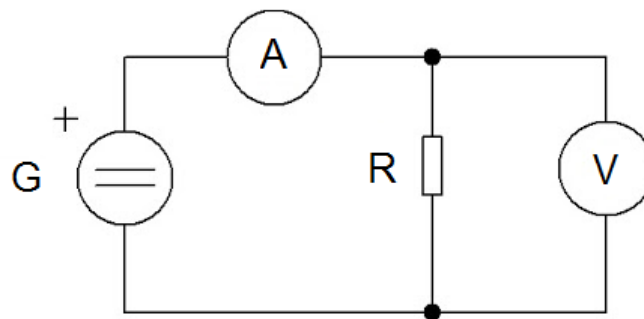
Z výše uvedených parametrů však lze spočítat jen spád mezi horní hladinou a výtokem. Pro kompletní určení spádu je třeba ještě připočíst výšku mezi výtokem a spodní hladinou vodního kola. Tuto výšku lze změřit a výsledný spád je pak součtem  $H_1$  a  $H_2$ . Při vzorovém měření byl výtok 10 cm nad spodní hladinou a výsledný spád  $H=0,15$  m.

Ze znalosti spádu a průtoku lze poté určit teoretický výkon vodního toku dle rovnice:

$$P_{teor} = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 0,15 \cdot 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 9,81 = 0,11 \text{ W} \quad (4.4)$$

#### 4.1.3 Měření výkonu

Dalším úkolem je určit základní elektrické parametry vodního kola v nalezeném pracovním bodě. Čerpadlo je nastaveno do svého pracovního bodu a ke generátoru je připojen testovací odpor na němž je měřen elektrický výkon. Schéma zapojení je následující:



Obr.: 4.2 Schéma zapojení měření výkonu

V nastaveném pracovním bodě je změřen proud a napětí a následně vypočítán výkon. Pro vzorové měření bylo v pracovním bodě naměřeno napětí 0,28 V a proud 2,6 mA, vypočítaný výkon je 0,728 mW.

Na základě znalosti teoretického výkonu a výkonu vodního kola, lze určit účinnost vodního kola. Je třeba zahrnout nízkou účinnost zvoleného generátoru, která se pohybuje dle výrobců mezi 30 až 40 %. Pro výpočet bylo zvoleno 30 %, což zároveň zahrnuje např. ztráty třením. Pro účinnost soustavy kola a generátoru lze napsat rovnici:

$$\eta_c = \eta_G \cdot \eta_k \quad (4.5)$$

$$\frac{P}{P_{teor}} = 0,3 \cdot \eta_k \quad (4.6)$$

$$\eta_k = \frac{P}{0,3 \cdot P_{teor}} 100 = \frac{0,728 \cdot 10^{-3}}{0,3 \cdot 0,11} 100 = 2,2 \% \quad (4.7)$$

## 4.2 Peltonova turbína

Měření na Peltonově turbíně vychází z matematických základů úlohy vodního kola a je zaměřeno na konstrukci charakteristik vodního toku a turbíny.

### 4.2.1 Měření parametrů vodního toku

Pro určení křivek vodního toku je třeba určit spád, průtok, teoretický výkon v různých pracovních bodech čerpadla.

Prvním úkolem je pomocí odměrných nádob proměřit průtoky v rozsahu nastavení čerpadla od 6 V do 11,5 V s krokem 0,5 V. Při každém bodě je třeba odměřit čas potřebný k přečerpání určeného objemu vody a následně vypočítat průtok:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.8)$$

Dále určit výtokovou rychlost, průměr trysky je 1,5 mm:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (4.9)$$

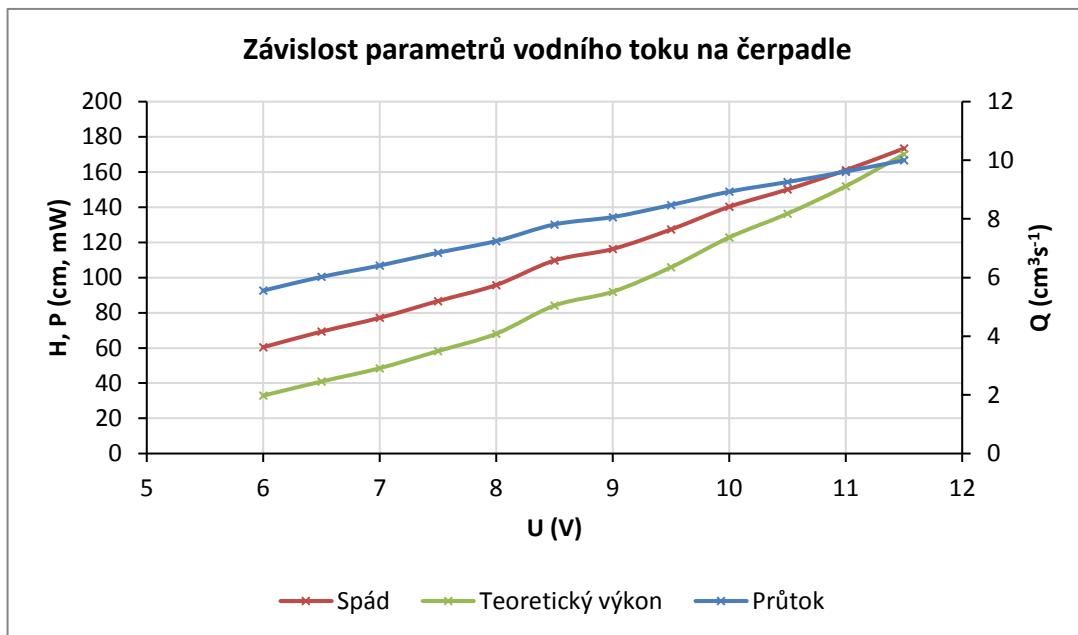
Z rychlosti lze dále vypočítat část spádu od horní hladiny k trysce. Celkový spád je pak o 10 cm vyšší:

$$H = \frac{v^2}{2 \cdot g} + 0,1 \quad (4.10)$$

A z výše uvedených parametrů určit výkon vodního toku:

$$P_{teor} = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \quad (4.11)$$

Z vypočtených parametrů byly konstruovány křivky vodního toku a byl vykreslen graf 4.1.

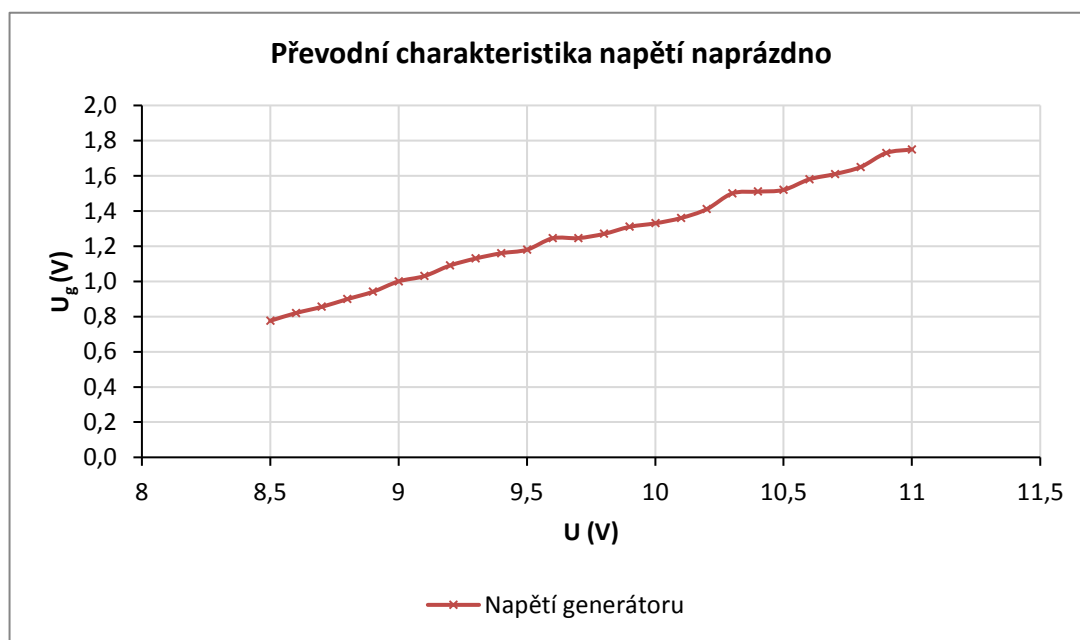


Graf 4.1 Závislost vodního toku na čerpadle

Křivky jsou vyneseny v závislosti na napětí čerpadla. Z grafu je vidět, že větší část teoretického výkonu je tvořena spádem, zatímco průtok je velmi malý. Toto odpovídá teoretickému předpokladu provozu turbíny na velkém spádu a malém průtoku.

#### 4.2.2 Měření naprázdno a měření výkonu

Dalším úkolem je proměřit charakteristiku napětí generátoru naprázdno v závislosti na nastavení pracovního bodu čerpadla, a tím parametrů vodního toku. Charakteristiku je třeba proměřit od okamžiku, kdy se turbína začne otáčet, až do napětí čerpadla 11 V. Takto získané napětí lze pomocí předchozího grafu 4.1 přiřadit konkrétním parametrům spádu a průtoku.



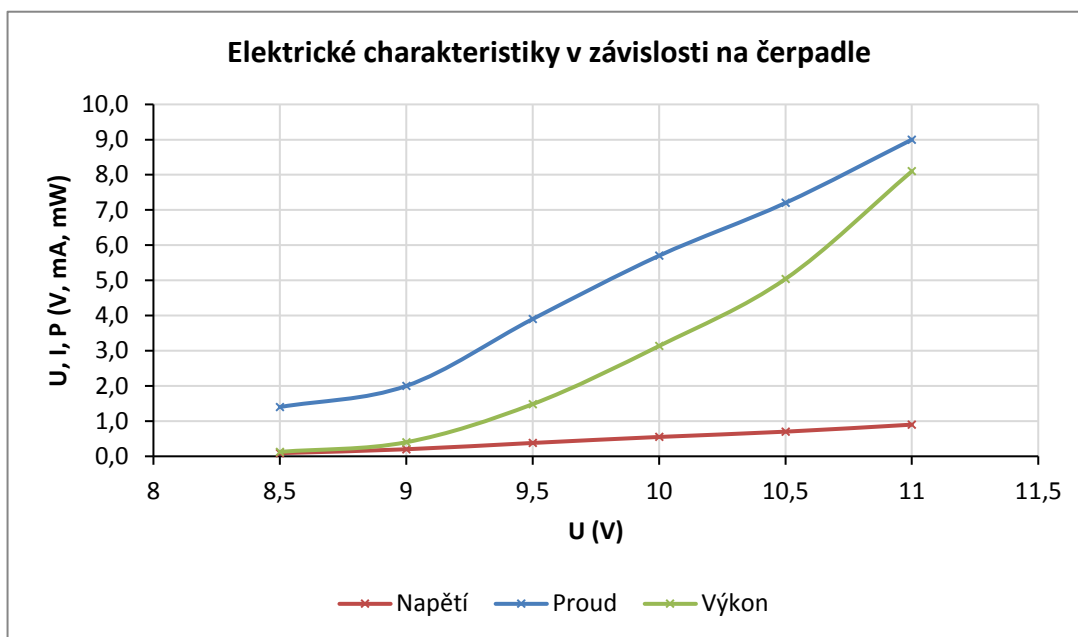
Graf 4.2 Napětí generátoru naprázdno

Graf 4.2 ukazuje charakteristiku napětí generátoru naprázdno. Turbína se začala otáčet při pracovním bodě čerpadla 8,5 V.

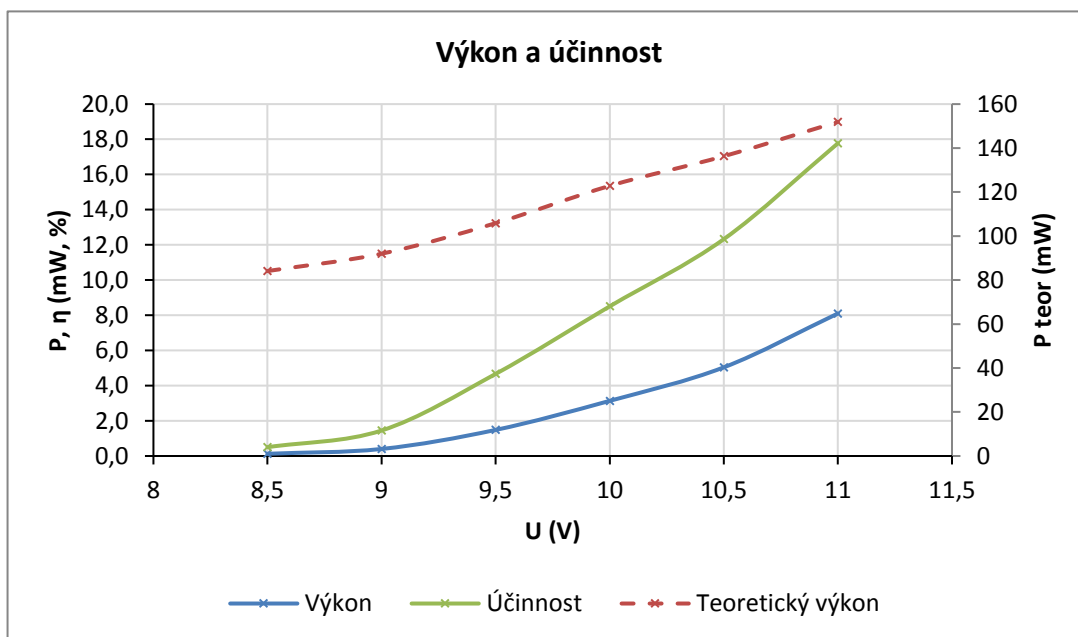
Následujícím úkolem je proměřit charakteristiky napětí, proudu, výkonu při připojení zátěže. Následně určit účinnost. Měření probíhá ve stejném intervalu jako převodní charakteristika s krokem 0,5 V. Měření je realizováno s připojenou zátěží viz schéma zapojení obr. 4.2. Z naměřených hodnot lze vypočítat výkon a ze znalosti teoretického výkonu a účinnosti generátoru 0,3 lze přibližně určit účinnost turbíny dle rovnice:

$$\eta_T = \frac{P}{0,3 \cdot P_{teor}} 100 \quad (4.12)$$

Z naměřených a vypočtených hodnot pak lze vykreslit dvojici grafů.



Graf 4.3 Elektrické parametry turbíny



Graf 4.4 Účinnost

Graf 4.3 ukazuje, že výkon se zvyšuje hlavně díky nárůstu proudu, zatímco napětí roste jen málo. Graf 4.4 ukazuje porovnání výkonu turbíny a teoretického výkonu toku doplněného o křivku účinnosti. Z grafu je patrné, že účinnost roste se zvyšováním výkonu.

## Závěr

Hlavním cílem práce je navržení laboratorní úlohy s použitím modelů vodních motorů vytvořených pomocí 3D tisku. V teoretické části práce jsou rozebrány detaily základních typů vodních motorů. Je popsán princip a funkce vodních kol i se základním matematickým popisem návrhu. Dále jsou diskutovány vodní turbíny a to včetně potřebných strojních součástí. V praktické části je rozpracován návrh vylepšení původních modelů vodních motorů s využitím 3D tisku. Následně je na těchto modelech provedeno vzorové měření a jsou vypracovány vzorové protokoly.

Byly konstruovány modely vodního kola, Peltonovy turbíny a Francisovy turbíny. Úprava těchto modelů je předmětem třetí kapitoly. Pro vodní kolo bylo řešeno zejména vylepšení uchycení a byl navržen nový stojan. Dále byly zkoumány možnosti umístění vodního kola do uzavřené krabičky a možnosti připojení generátoru. Pro model byla navržena plexisklová krabice, ze které je vyvedena hřídel, pro níž bylo navrženo převodové kolo. Převodové kolo dále pohání stejnosměrný generátor připojený řemenným převodem. Nakonec byly pro vodní kolo navrženy díly pro přívod vody.

Pro model Peltonovy turbíny byly řešené podobné problémy, jako u modelu vodního kola. Byl navržen stojan pro uchycení turbíny, dále krycí krabička a připojení ke generátoru pomocí řemenného převodu.

Úpravy Francisovy turbíny byly zaměřeny na geometrii oběžného kola a dále na přepracování rozvaděče. Oběžné kolo bylo upraveno tak, aby začátek lopatky překrýval konec lopatky vedlejší a lopatková mříž tak nebyla průhledná při pohledu ve směru osy hřídele. Základem úprav regulátoru byla změna geometrie lopatek. Lopatky byly prodlouženy tak, aby při zavření regulátoru došlo k jejich vzájemnému zapření. Dále byly upraveny víka regulátoru zvětšením průměrů a doplněním o otvory pro sešroubování a umístění do kašny. Otáčení lopatek probíhá pomocí posunu regulačního kruhu, ke kterému jsou lopatky připojeny soustavou dvojice táhel. Změnou poměru délek táhel oproti původnímu návrhu bylo dosaženo většího úhlu otevření při menším posunu regulačního kruhu. Dále byla pro Francisovu turbínu navržena plexisklová zakrytá kašna. Samotná turbína je uchycena na hřídeli v ložiscích.

Pro upravené modely byly ve čtvrté kapitole navrženy laboratorní úlohy. Experimentální testování na Francisově turbíně ukázalo, že pro model je potřeba velký průtok (testováno zahradním čerpadlem o výkonu 400 W) a vzhledem k velkému objemu vody nebyla pro tento model laboratorní úloha navrhována a model slouží pro demonstraci funkce regulátoru a Francisova kola.

Laboratorní úloha pro vodní kolo je navržena jako hledání optimálního provozního bodu a následného výpočtu parametrů. Voda je k modelu přiváděna čerpadlem, které simuluje reálný tok a lze spočítat ekvivalentní podmínky, které by takovému toku odpovídaly. Z měření průtoku v pracovním bodě čerpadla lze určit výtokovou rychlost vody a následně aplikací Torricelliho vzorce lze získat spád. Z toho je možné určit teoretický výkon toku. Poté jsou měřeny parametry na generátoru. Je spočítán výkon a účinnost. Malá účinnost vodního kola je dána tím, že v navržené úloze je teoretický výkon počítán z hrubého spádu, který vodním kolem není z většiny využit.

V laboratorní úloze s Peltonovou turbínou jsou měřeny a konstruovány charakteristiky vodního toku a dále charakteristiky samotného modelu. Je proměřen průtok ve více pracovních bodech čerpadla a pro každý pracovní bod jsou určeny parametry vodního toku stejnou metodou jako u výpočtu vodního kola. Následně jsou z těchto parametrů konstruovány grafy závislosti na nastavení čerpadla. Poté je provedeno měření napětí na generátoru naprázdno a následně proměřena výkonová charakteristika při připojení zátěže. Z těchto měření jsou opět konstruovány křivky závislosti hodnot na pracovním bodě čerpadla.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] COMMITTEE, ASME hydropower technical. *The guide to hydropower mechanical design*. Kansas city: HCI publications, 1996. ISBN 0-9651765-0-9.
- [2] DUŠIČKA, GABRIEL, HODÁK, ČIHÁK, ŠULEK. *Malé vodní elektrárny*. Bratislava: Jaga group, v. o. s., 2003. ISBN 80-88905-45-1.
- [3] ŠKORPIL, Kasářík. *Obnovitelné zdroje energie I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-675-4.
- [4] MELICHAR, VOJTEK, BLÁHA. *Malé vodní turbíny*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01808-0.
- [5] VOBOŘIL, David. Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *O energetice* [online]. 2016 [vid. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [6] BELLIS, Mary. The History of the Water Wheel. *thoughtco.com* [online]. 2019 [vid. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/history-of-waterwheel-4077881>
- [7] NEŠPOROVÁ, Kristýna. Vodní mlýn jako zdroj energie. *drevostavitel.cz* [online]. 2017 [vid. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/vodni-mlyn>
- [8] Types of water wheels. *powerinthelandscape.co.uk* [online]. [vid. 2019-12-02]. Dostupné z: [http://www.powerinthelandscape.co.uk/water/water\\_wheels.html](http://www.powerinthelandscape.co.uk/water/water_wheels.html)
- [9] Hřebenáč. *mve energetika* [online]. [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/vodnikolaDD/hrebenac.htm>
- [10] Ponceletovo vodní kolo. *mve energetika* [online]. [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/vodnikolaDD/poncelet.htm>
- [11] Peltonova turbína. *mve.energetika.cz* [online]. [vid. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/pelton.htm>
- [12] BEDNÁŘ JOSEF. *Malé vodní elektrárny 2*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 04-220-89.
- [13] KLAMINSKÝ JAROSLAV, Vrtek Mojmír. *Obnovitelné zdroje energie*. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1999. ISBN 80-7078-445-8.
- [14] BRNO, Strojírny. *Peltonova turbína* [online]. [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://strojirnybrno.com/vodni-turbiny/pelton/>
- [15] *Kaplanova turbína* [online]. 2017 [vid. 2020-04-25]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova\\_turbina](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turbina)
- [16] *Turbíny* [online]. [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.ckdblansko.cz/cs/produkty-a-sluzby/turbiny>
- [17] Francisova turbína. *Strojírny Brno* [online]. [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://strojirnybrno.com/vodni-turbiny/francis/>
- [18] MVE Pod Zámkem. *opravymve.cz* [online]. 2013 [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.opravymve.cz/mve-pod-zamkem/>
- [19] Introduction of Turgo turbine. *m.savvy-ind.com* [online]. 2019 [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://m.savvy-ind.com/info/introduction-of-turgo-turbine-38329589.html>

## **Seznam příloh**

**Příloha A - CD**

**Příloha B - Výkresy pro vodní kolo a Peltonovu turbínu**

**Příloha C - Výkresy součástí pro úpravu Francisovy turbíny**

**Příloha D - Protokol z měření na vodním kole**

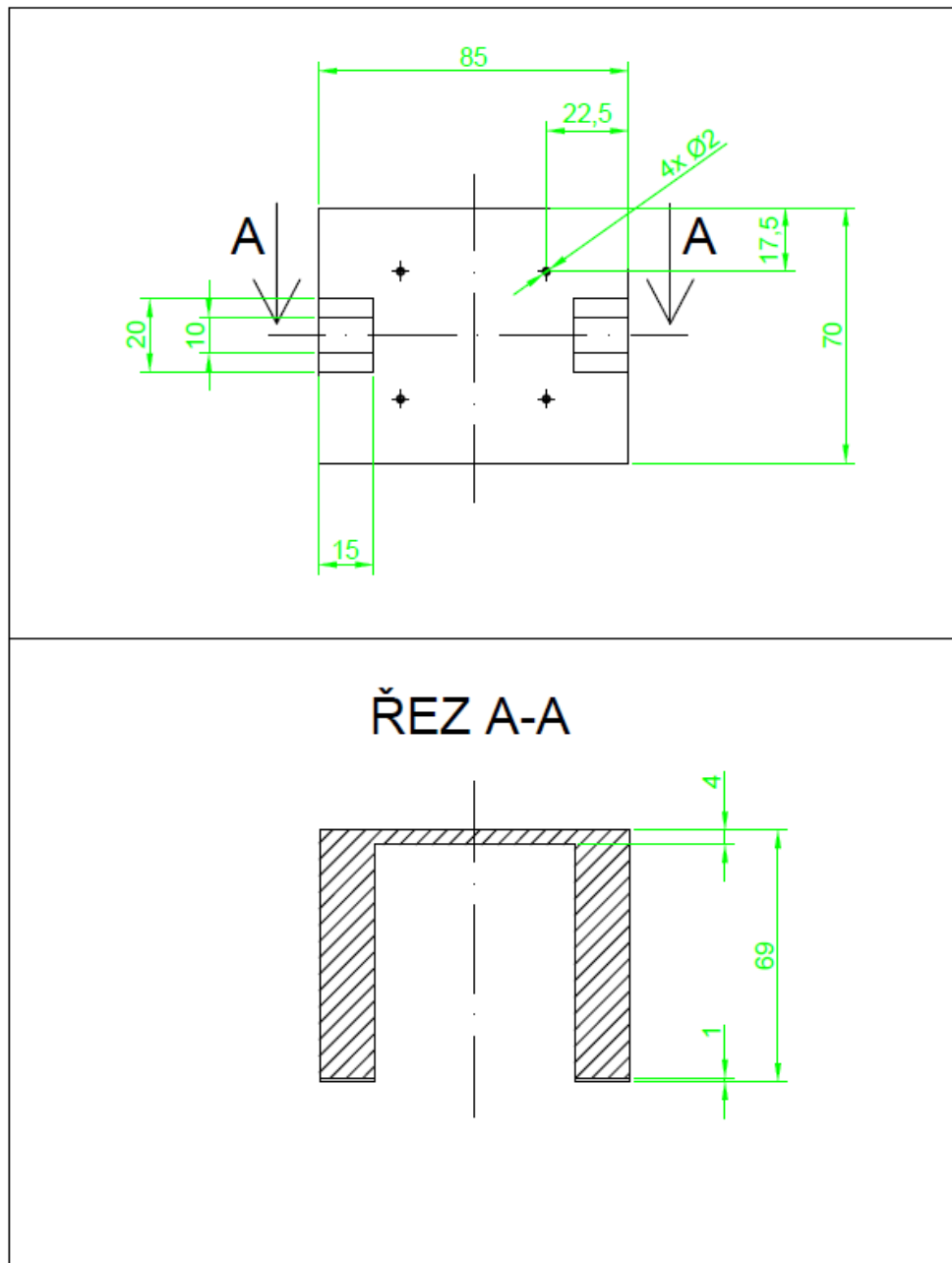
**Příloha E - Protokol z měření na Peltonově turbíně**

## **Příloha A**

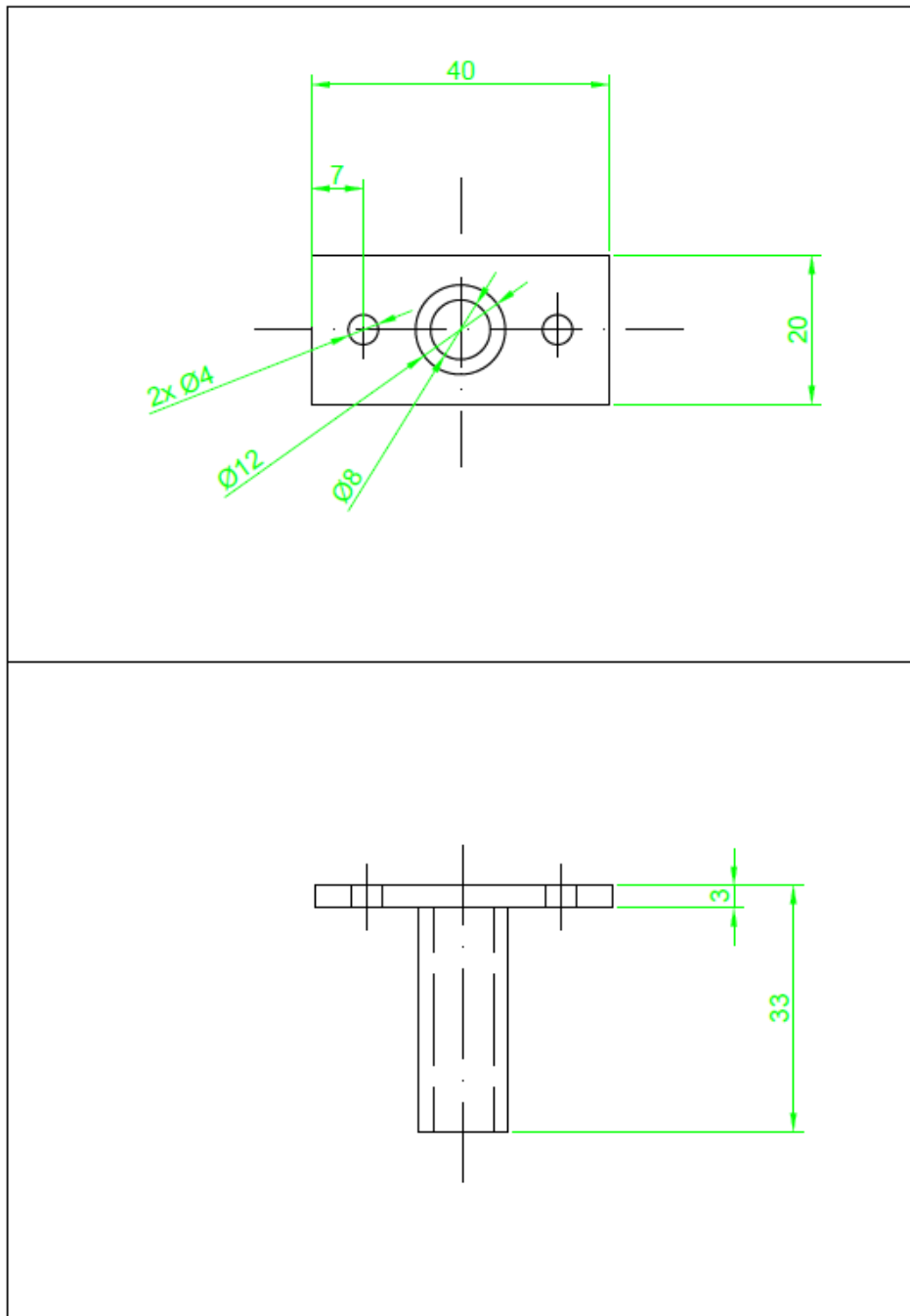
**Optický nosič, který obsahuje elektronickou verzi práce. Dále modely součástí v programu AutoCAD a jejich úpravu pro 3D tisk.**

## Příloha B

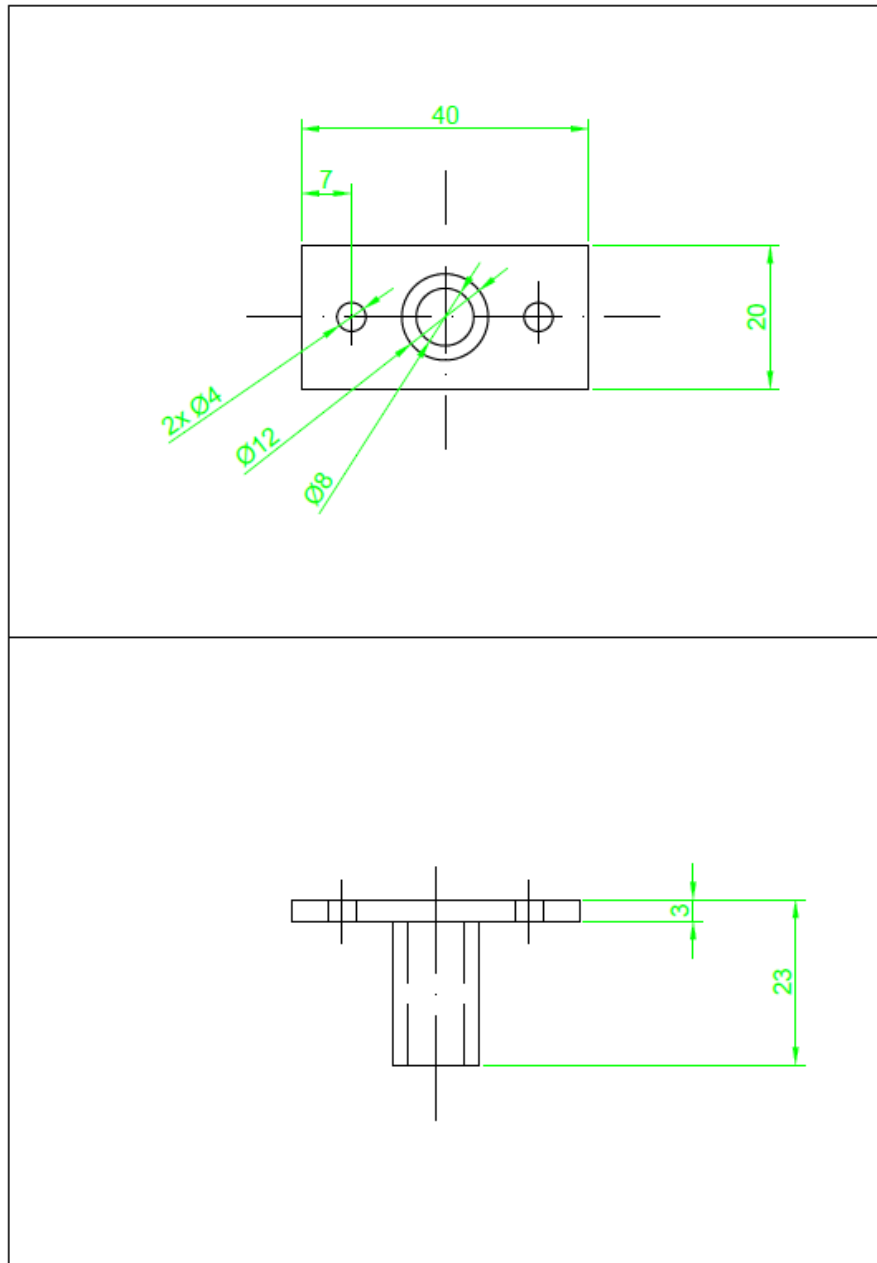
Výkresy pro vodní kolo a Peltonovu turbínu.



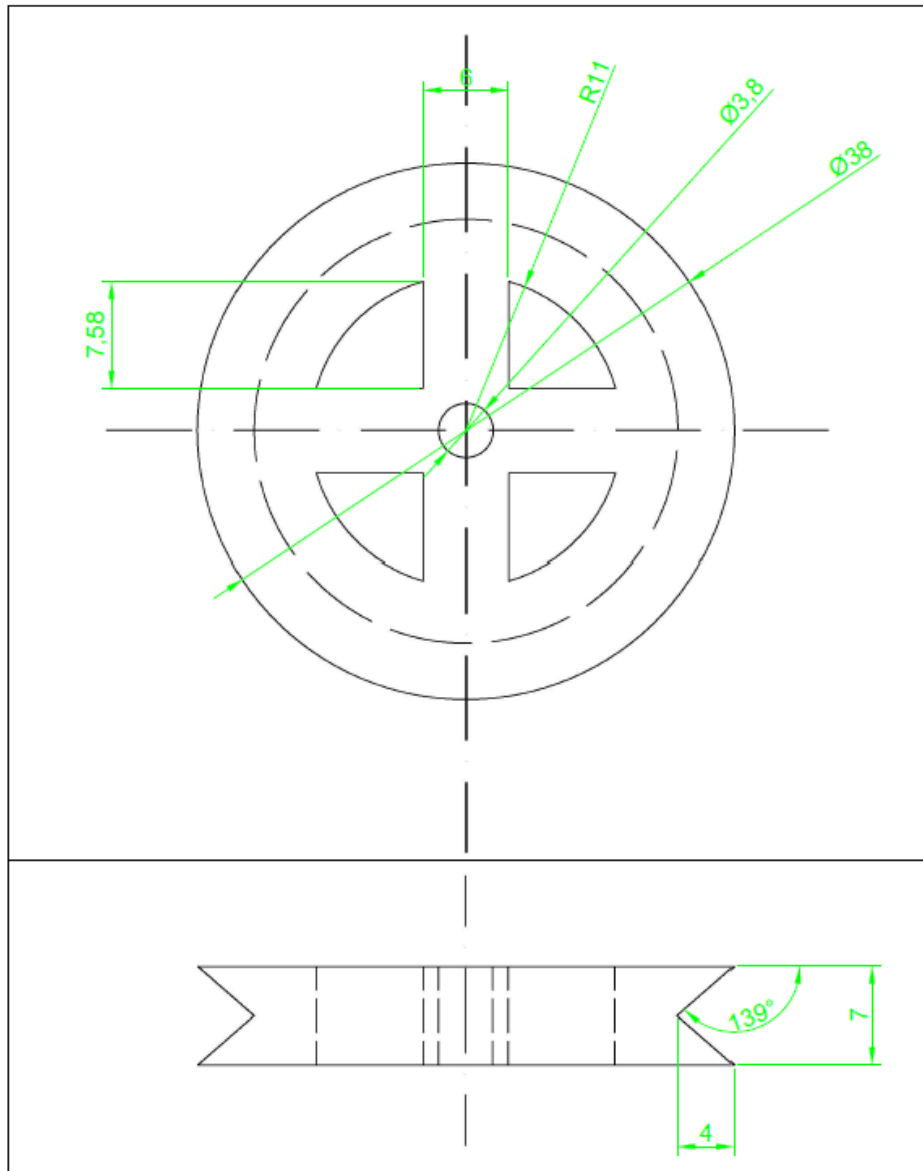
Stojan	
Měřítko	1:2
Počet	2 ks



Přívod dolní část	
Měřítko	1:1
Počet	1 ks



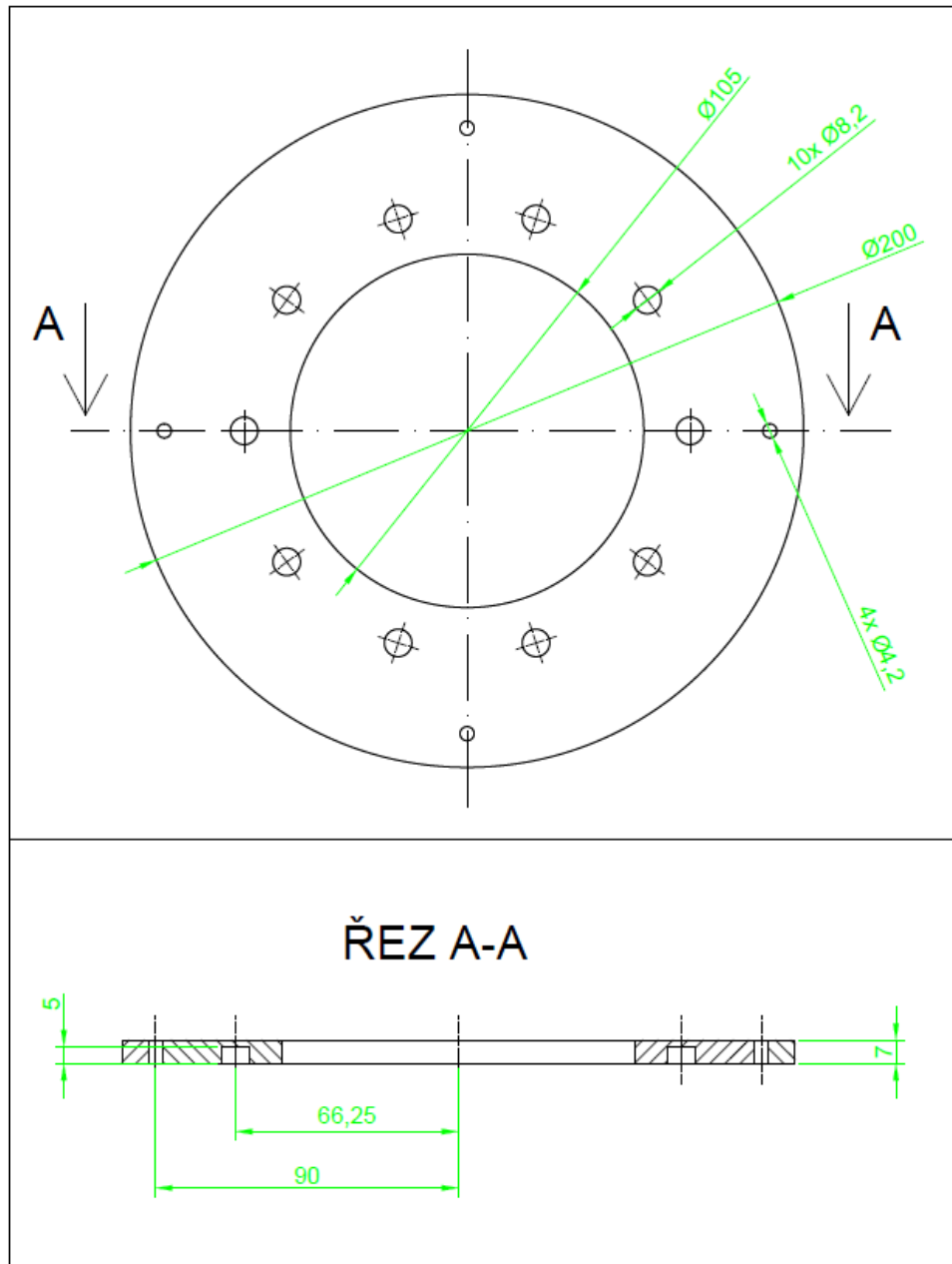
Přívod horní část	
Měřítko	1:1
Počet	1 ks



Převodové kolo	
Měřítko	2:1
Počet	2 ks

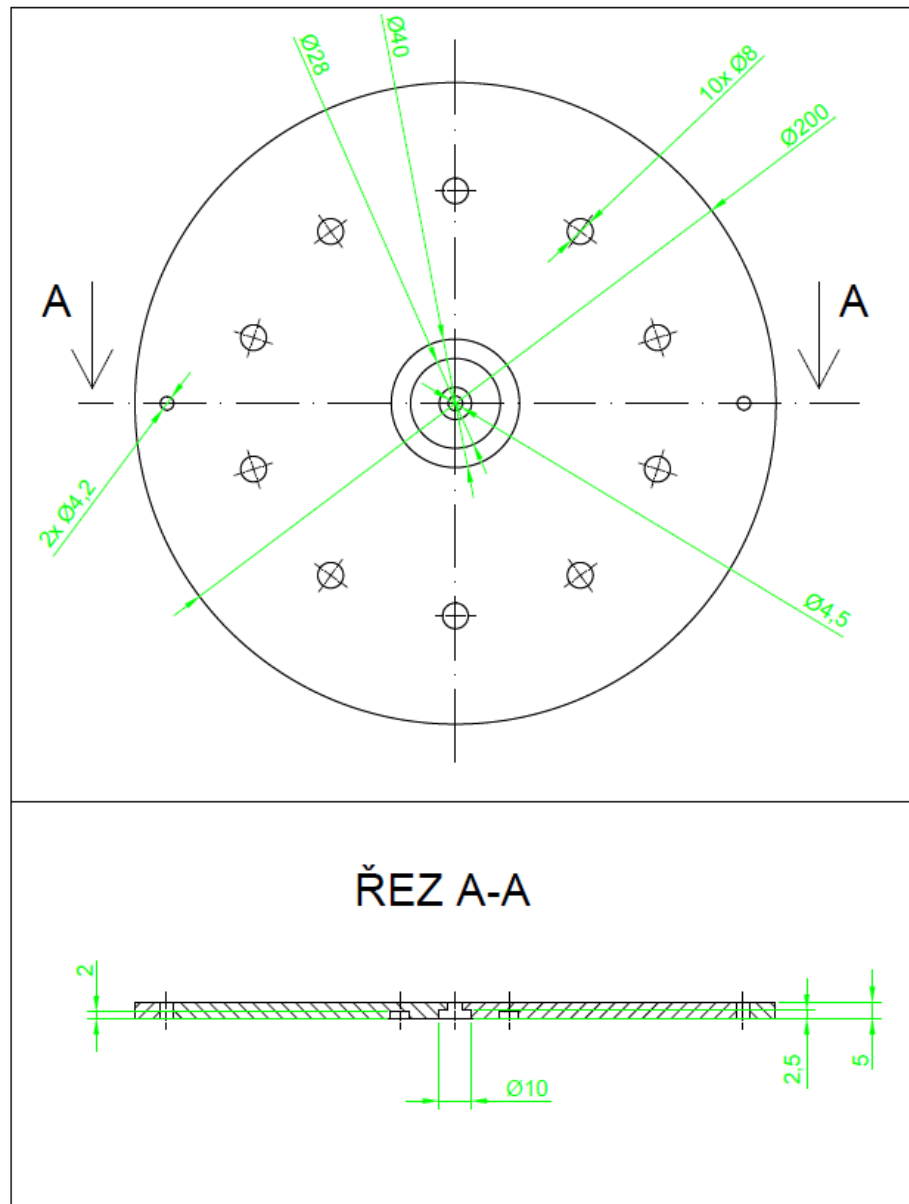
## Příloha C

Výkresy součástí pro úpravu Francisovy turbíny.

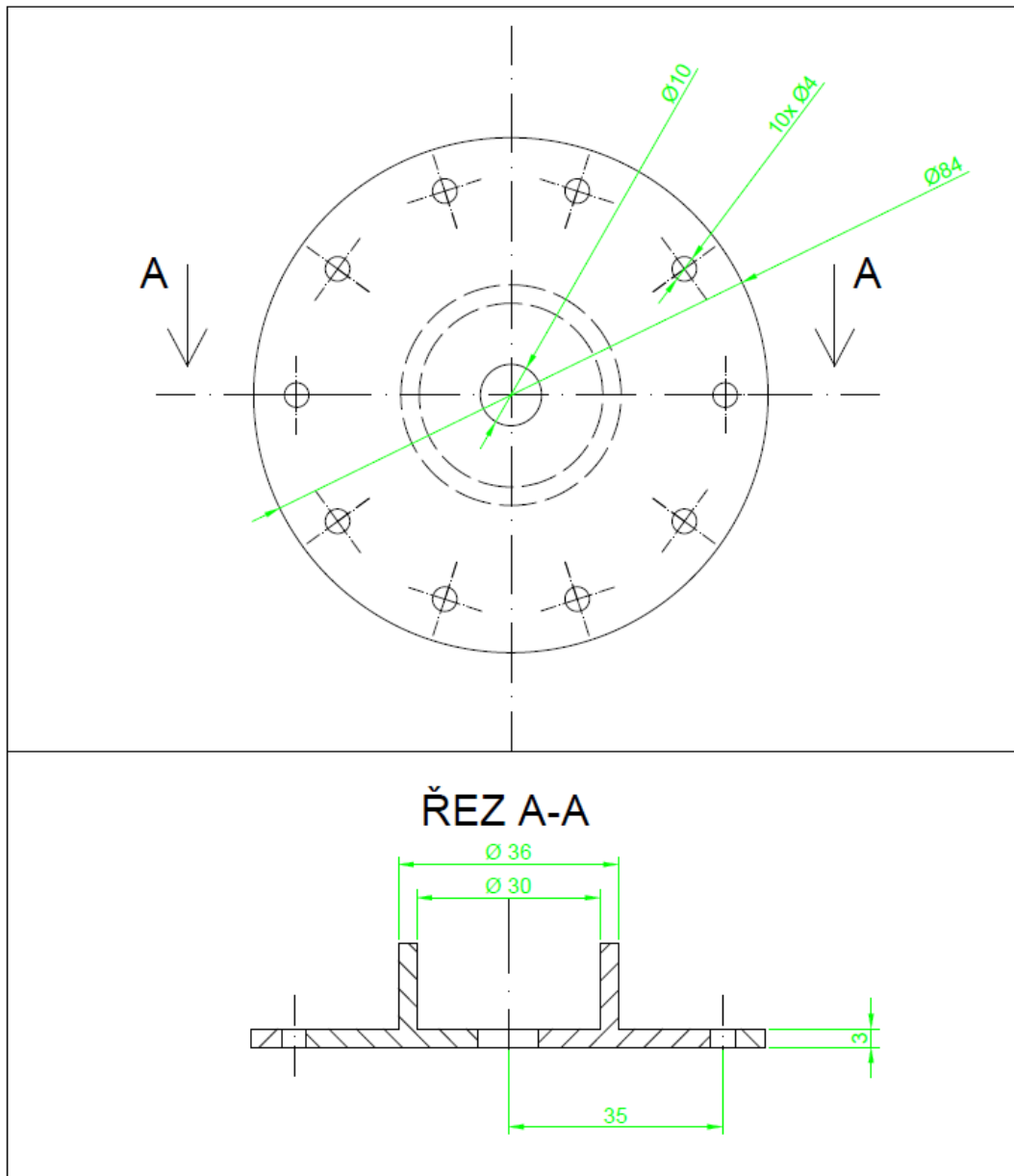


Spodní kruh	
Měřítko	1:2
Počet	1 ks

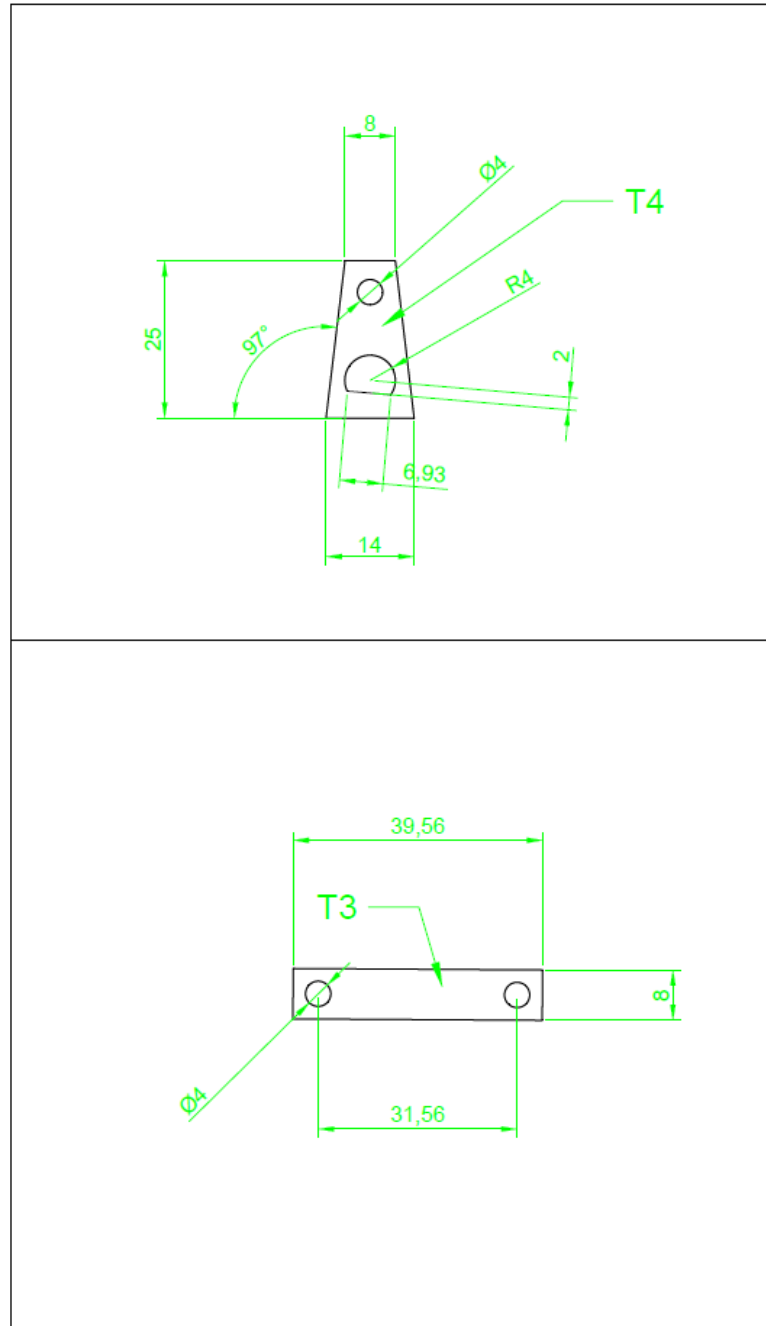




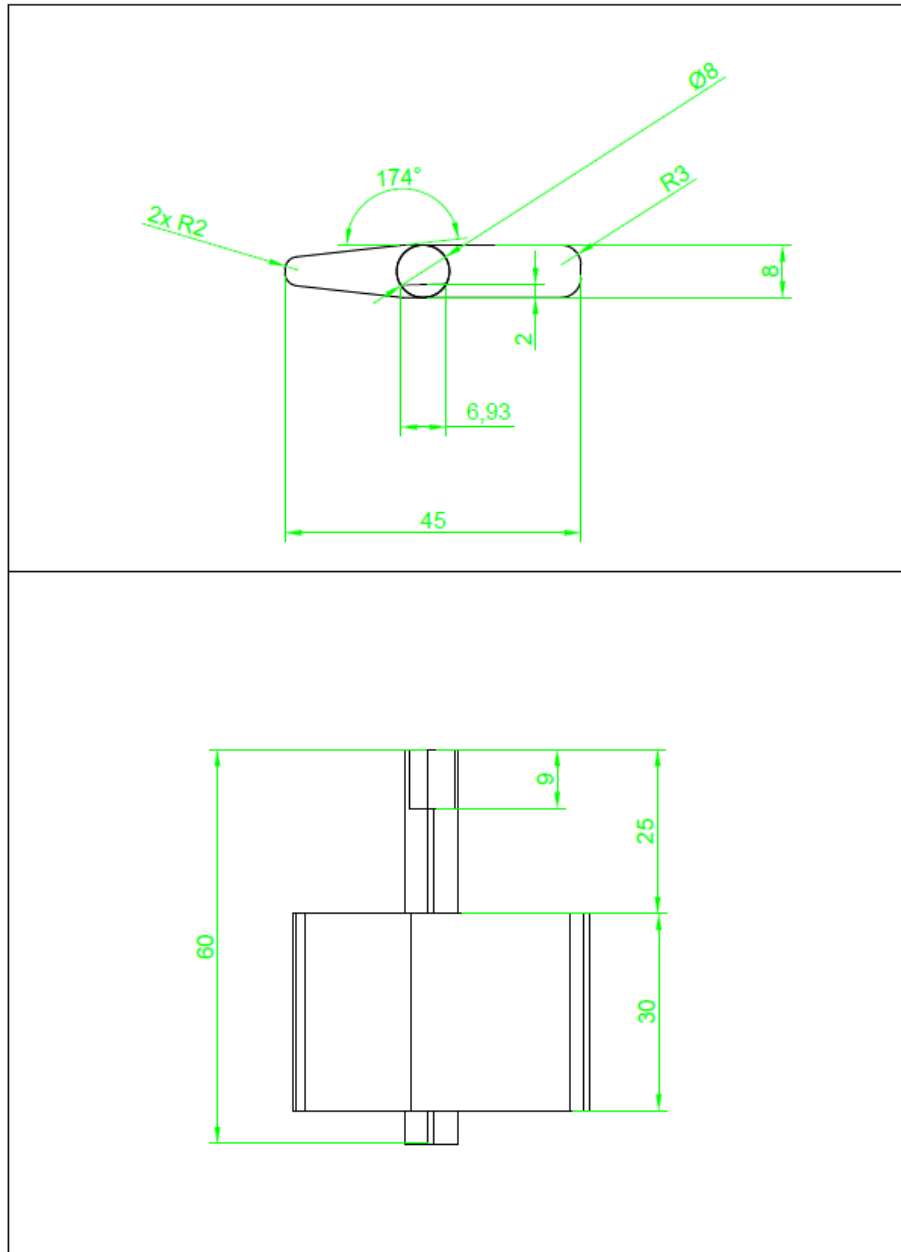
Horní kruh	
Měřítko	1:2
Počet	1 ks



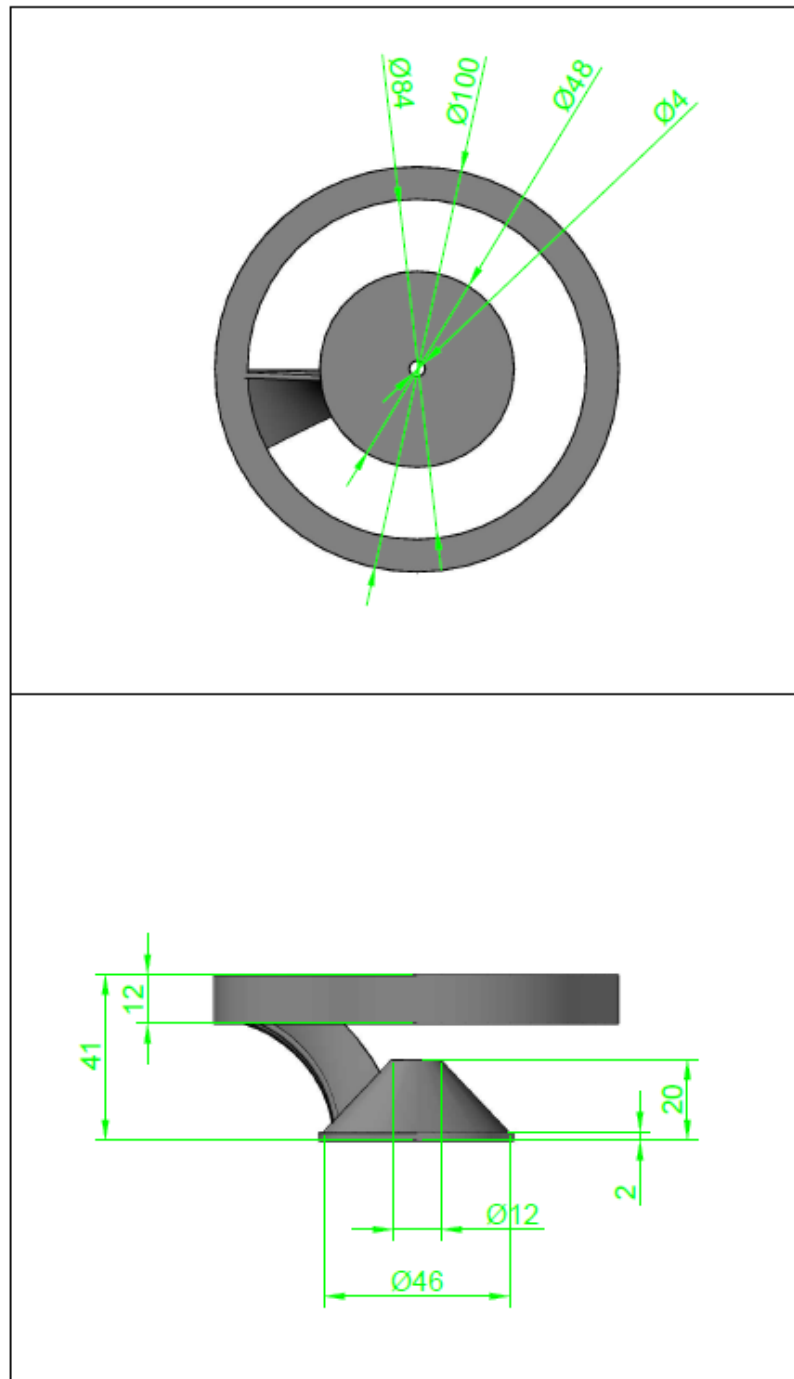
Regulační kruh	
Měřítko	1:1
Počet	1 ks



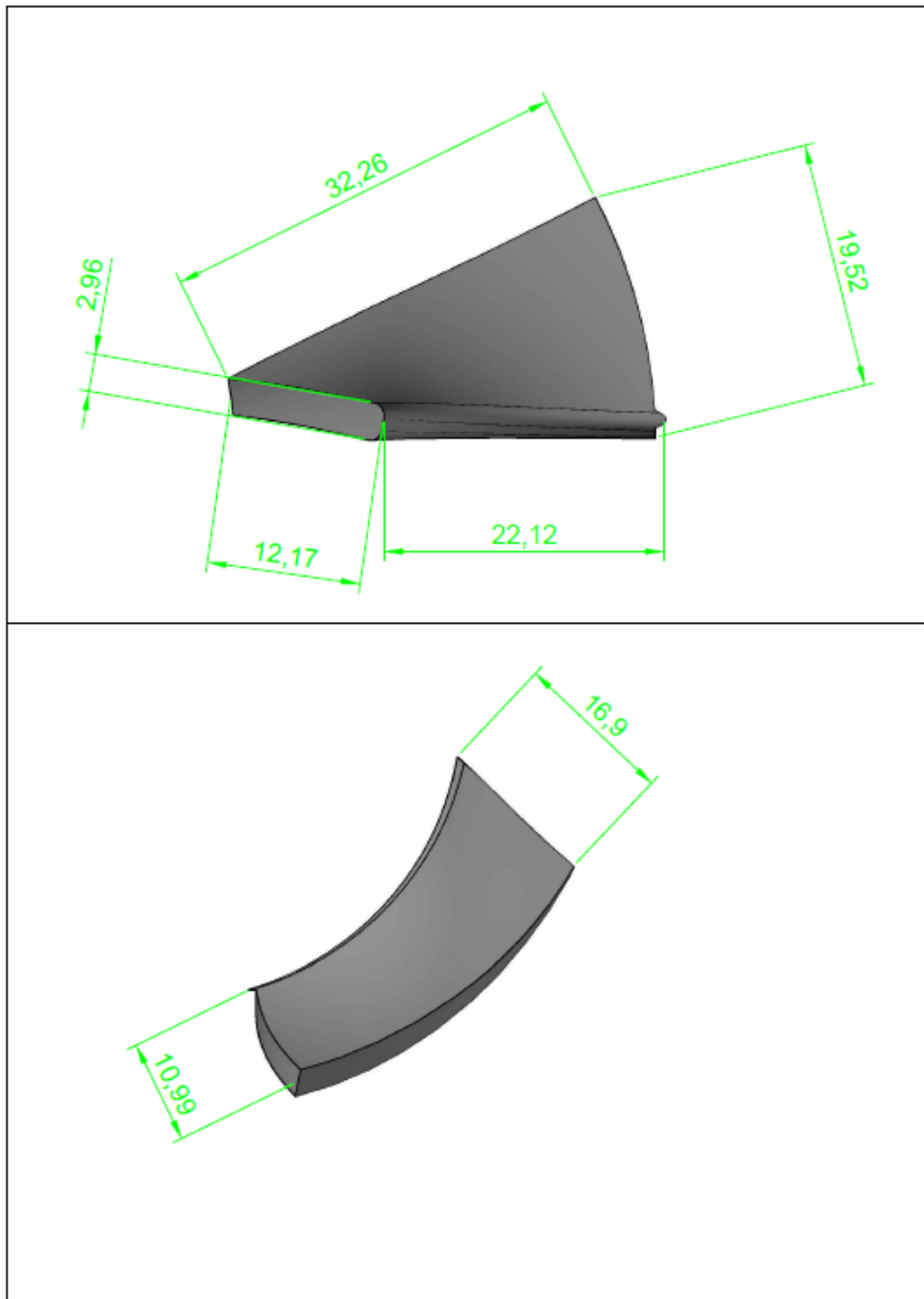
Táhla lopatek	
Měřítko	1:1
Počet	10 ks každá



Lopatky	
Měřítko	1:1
Počet	10 ks



Francisova turbína	
Měřítko	1:2
Počet	1 ks



Lopátka Francis. turbíny	
Měřítko	1:1
Počet	14 ks

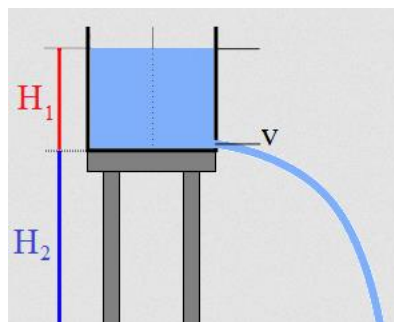
## Příloha D

### 1 Zadání

1. Postupným nastavováním parametrů čerpadla nalezněte ideální pracovní bod, kdy se voda ještě stíhá z kola vylévat bez rozstříkávání. Bod je charakterizován napětím čerpadla.
2. V daném bodě čerpadla změřte průtok  $Q$ .
3. Z měření průtoku určete ostatní parametry vodního toku: Spád  $H$ , teoretický výkon  $P_{\text{teor.}}$ .
4. Připojte ke generátoru zátěž a proveďte měření výkonu na zátěži v daném pracovním bodě čerpadla.
5. Určete účinnost vodního kola (započítejte účinnost generátoru cca 30 %).

### 2 Teoretický úvod

Předmětem měření je vodní kolo typu horní korečník. Měření průtoku lze realizovat pomocí odměrné nádoby. Na základě znalosti průtoku a průřezu výtokového profilu lze určit výtokovou rychlost. Dále použitím Torricelliho výrazu lze určit výšku hladiny, která je teoreticky potřeba, aby voda vytékala z otvoru určenou rychlostí. Tato hodnota udává spád od horní hladiny k výtoku, k tomuto spádu je třeba připočíst výšku výtokového profilu nad spodní hladinou pro získání celkového spádu (viz obr. 2.1). Poté lze určit teoretický výkon. Následně lze změřit výkon na zátěži a určit účinnost.



Obr 2.1: Určení spádu

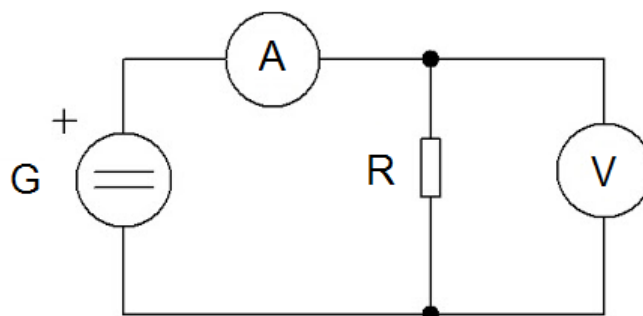
### 3 Měření

Hledání pracovního bodu bylo provedeno postupným nastavováním napětí čerpadla na laboratorním zdroji stejnosměrného napětí. Po nalezení pracovního bodu jsem určila průtok pomocí měření času pro přečerpání 0,5 litru kapaliny. Poté jsem z určeného průtoku vypočetla rychlost výtoku, následně spád a poté teoretický výkon. Nakonec jsem provedla

měření výkonu na zátěži o odporu  $R=100\ \Omega$  v určeném pracovním bodě a vypočetla účinnost.

### 3.1 Schéma zapojení

Měření průtoku probíhá bez měření na generátoru, generátor pracuje naprázdno. Pro měření výkonu je použito zapojení dle schématu níže.



Obr.: 3.1 Schéma zapojení měření výkonu

### 3.2 Naměřené a vypočítané hodnoty

Pracovní bod čerpadla:  $U_{\xi} = 6,3\ \text{V}$

Naměřené hodnoty pro parametry vodního toku: Objem kapaliny  $V = 0,5\ \text{l}$ , čas na přečerpání  $t = 6,9\ \text{s}$ . Výška výtoku nad spodní hladinou  $H_2 = 10\ \text{cm}$ . Poloměr výtočného profilu  $r = 4,75\ \text{mm}$ .

Vypočtené hodnoty shrnuje následující tabulka:

Tabulka 3.1: parametry vodního toku

$Q\ [\text{m}^3\text{s}^{-1}]$	7,25E-05
$v\ [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	1,02
$H\ [\text{m}]$	0,15
$P_{\text{teor}}\ [\text{W}]$	0,11

Při měření výkonu bylo naměřeno napětí  $U = 0,28\ \text{V}$  a proud  $I = 2,6\ \text{mA}$ . Výpočtem byl určen výkon  $P = 0,728\ \text{W}$  a účinnost 2,2 %.



### 3.3 Ukázka výpočtu

Parametry vodního toku:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,0005}{6,9} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{7,2 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 0,00475^2} = 1,02 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$H = H_1 + H_2 = \frac{v^2}{2 \cdot g} + 0,1 = \frac{1,02^2}{2 \cdot 9,81} + 0,1 = 0,15 \text{ m} \quad (3)$$

$$P_{teor} = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 0,15 \cdot 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 9,81 = 0,11 \text{ W} \quad (4)$$

Určení výkonu a účinnosti:

$$P = U \cdot I = 0,28 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} = 0,728 \text{ W} \quad (5)$$

$$\eta_c = \eta_G \cdot \eta_k \quad (6)$$

$$\frac{P}{P_{teor}} = 0,3 \cdot \eta_k \quad (7)$$

$$\eta_k = \frac{P}{0,3 \cdot P_{teor}} 100 = \frac{0,728 \cdot 10^{-3}}{0,3 \cdot 0,11} 100 = 2,2 \% \quad (8)$$

## 4 Závěr

Bylo provedeno měření na vodním kole. Byl určen nejvyšší pracovní bod čerpadla, při němž vodní kolo pracuje bez rozstříku vody do okolí. Poté byl změřen průtok a určeny parametry vodního toku, spád, výtoková rychlost a teoretický výkon, výsledky shrnuje tabulka 3.1. Následně bylo provedeno měření výkonu a výpočet účinnosti se zahrnutím účinnosti generátoru. Teoretický výkon vodního toku je dán hlavně spádem, průtok je malý. Spád je vypočten ze znalosti výtokové rychlosti a přičtení výšky výtokového profilu nad spodní hladinou. Důvod, proč je spočítaná účinnost malá (jen 2,2 %) je, že z teoretického výkonu je většina nevyužita, protože využitelný spád pro vodní kolo je o dost menší než celkový spád toku, vodní kolo je navíc vysoko nad spodní hladinou. Větší část spádu tvoří výška výtokového profilu.

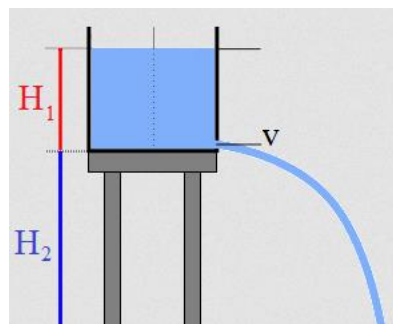
## Příloha E

### 1 Zadání

- Proměřte průtok  $Q$  vytvořený čerpadlem v rozsahu napětí čerpadla od 6 V do 11,5 V s krokem 0,5 V. V každém bodě určete spád  $H$  a teoretický výkon  $P_{\text{teor}}$ . Průměr trysky je 1,5 mm.
- Proměřte charakteristiku generátoru naprázdno v závislosti na nastaveném pracovním bodě čerpadla. Měřte od okamžiku roztočení turbíny až do 11 V napětí čerpadla. V každém bodě určete výkon a účinnost (započítejte účinnost generátoru 30 %).
- Proveďte měření výkonu v rozsahu nastavení čerpadla dle bodu 2 zadání.
- Z bodu 1 zkonstruuje graf závislosti parametrů  $H, Q, P_{\text{teor}} = f(U_{\text{č}})$ .
- Dle bodu 2 vykreslete graf závislosti  $U_g = f(U_{\text{č}})$ .
- Na základě bodu 3 vykreslete charakteristiky  $U, I, P = f(U_{\text{č}})$  a  $P, P_{\text{teor}}, \eta_{\text{turbíny}} = f(U_{\text{č}})$

### 2 Teoretický úvod

Předmětem měření je Peltonova turbína. Měření průtoku lze realizovat pomocí odměrné nádoby. Na základě znalosti průtoku a průřezu výtokového profilu lze určit výtokovou rychlost. Dále použitím Torricelliho výrazu lze určit výšku hladiny, která je teoreticky potřeba, aby voda vytékala z otvoru určenou rychlostí. Tato hodnota udává spád od horní hladiny k výtoku, k tomuto spádu je třeba připočíst výšku výtokového profilu nad spodní hladinou pro získání celkového spádu (viz obr. 3.1). Poté lze určit teoretický výkon. Následně lze změřit napětí naprázdno a proměřit výkon na zátěži a určit účinnost.



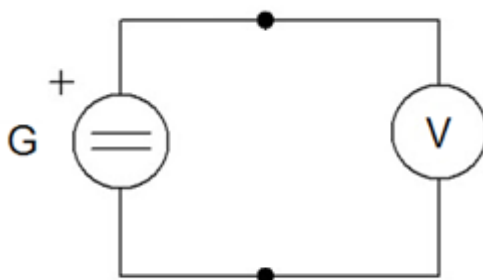
Obr 2.1: Určení spádu

### 3 Měření

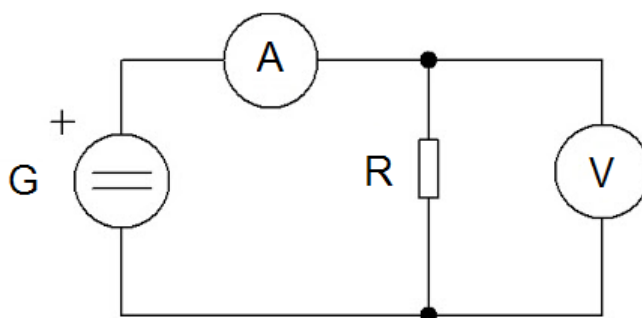
Průtok v jednotlivých bodech jsem určila měřením času potřebného k přečerpání 0,5 litru kapaliny a následným výpočtem. Poté jsem z určeného průtoku vypočetla rychlost výtoku, následně spád a poté teoretický výkon. Poté jsem měřila charakteristiku naprázdno a následně výkonovou charakteristiku a určila účinnost. Na závěr jsem zkonstruovala grafy dle zadání.

#### 3.1 Schéma zapojení

Měření průtoku probíhá bez měření na generátoru, generátor pracuje naprázdno. Pro měření charakteristiky naprázdno je použito zapojení dle obr. 3.1 a pro měření výkonu zapojení dle obrázku 3.2



Obr.: 3.1 Schéma zapojení měření napětí naprázdno



Obr.: 3.2 Schéma zapojení měření výkonu

### 3.2 Naměřené a vypočítané hodnoty

Následující tabulky shrnují naměřené a vypočítané hodnoty

Tabulka 3.1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro parametry vodního toku

Uč [V]	t [s]	Q [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	H [m]	P <sub>teor</sub> [W]
6	90	5,56E-06	3,15	0,60	0,033
6,5	83	6,02E-06	3,41	0,69	0,041
7	78	6,41E-06	3,63	0,77	0,049
7,5	73	6,85E-06	3,88	0,87	0,058
8	69	7,25E-06	4,10	0,96	0,068
8,5	64	7,81E-06	4,42	1,10	0,084
9	62	8,06E-06	4,57	1,16	0,092
9,5	59	8,47E-06	4,80	1,27	0,106
10	56	8,93E-06	5,06	1,40	0,123
10,5	54	9,26E-06	5,24	1,50	0,136
11	52	9,62E-06	5,44	1,61	0,152

Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty při měření generátoru naprázdno

Uč [V]	U <sub>g</sub> [V]
8,5	0,776
8,6	0,82
8,7	0,855
8,8	0,899
8,9	0,941
9	1
9,1	1,03
9,2	1,09
9,3	1,13
9,4	1,16
9,5	1,18
9,6	1,245
9,7	1,246
9,8	1,27
9,9	1,31
10	1,33
10,1	1,36
10,2	1,41
10,3	1,5
10,4	1,51
10,5	1,52
10,6	1,58
10,7	1,61
10,8	1,65
10,9	1,73
11	1,75

Tabulka 3.3: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření výkonu

Uč [V]	U [V]	I [mA]	P [mW]	$\eta_t$ [%]
8,5	0,09	1,4	0,126	0,50
9	0,2	2	0,4	1,45
9,5	0,38	3,9	1,482	4,67
10	0,55	5,7	3,135	8,51
10,5	0,7	7,2	5,04	12,32
11	0,9	9	8,1	17,77

### 3.3 Ukázka výpočtu

Parametry vodního toku:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,0005}{90} = 5,56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{5,56 \cdot 10^{-6}}{\pi 0,00075^2} = 3,15 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$H = H_1 + H_2 = \frac{v^2}{2 \cdot g} + 0,1 = \frac{3,15^2}{2 \cdot 9,81} + 0,1 = 0,6 \text{ m} \quad (3)$$

$$P_{teor} = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 0,6 \cdot 5,56 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 9,81 = 0,033 \text{ W} \quad (4)$$

Určení výkonu a účinnosti:

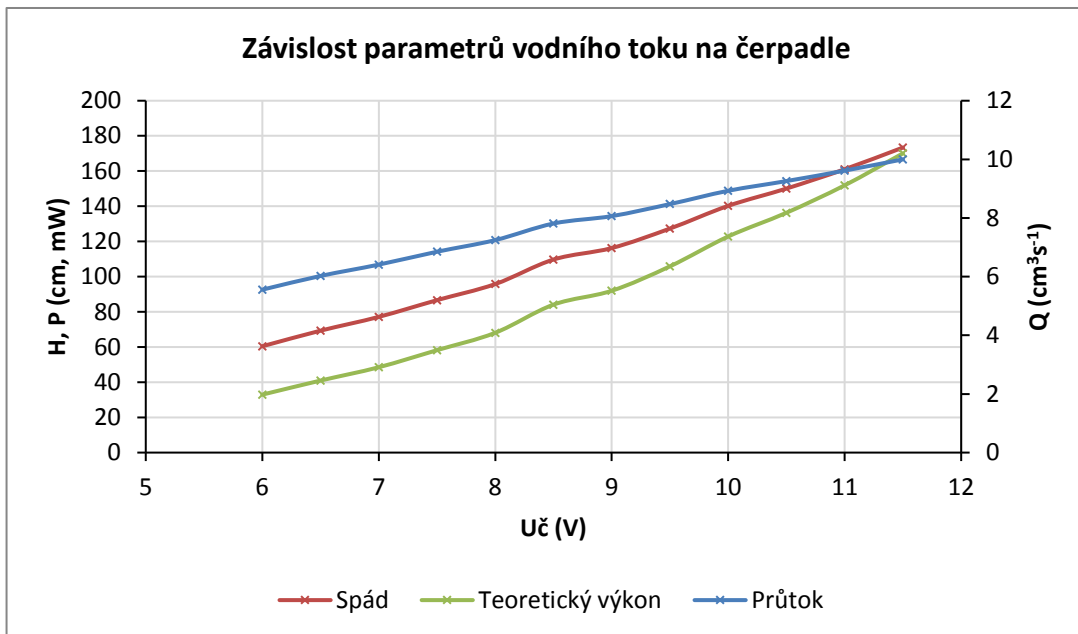
$$P = U \cdot I = 0,09 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} = 0,126 \text{ W} \quad (5)$$

$$\eta_c = \eta_G \cdot \eta_t \quad (6)$$

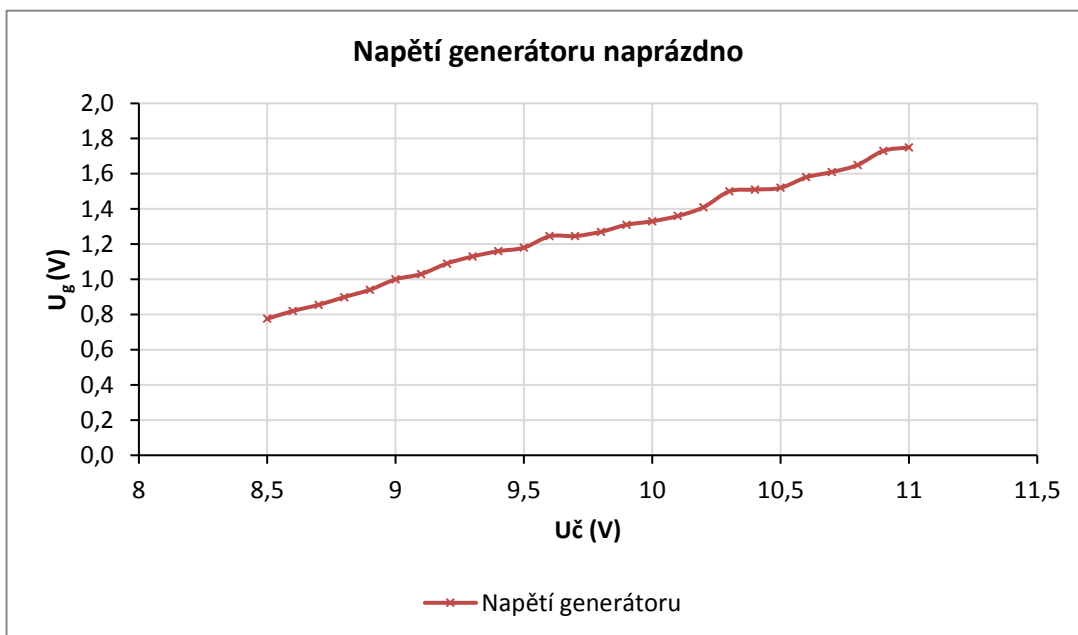
$$\frac{P}{P_{teor}} = 0,3 \cdot \eta_t \quad (7)$$

$$\eta_t = \frac{P}{0,3 \cdot P_{teor}} \cdot 100 = \frac{0,126 \cdot 10^{-3}}{0,3 \cdot 0,033} \cdot 100 = 0,5 \% \quad (8)$$

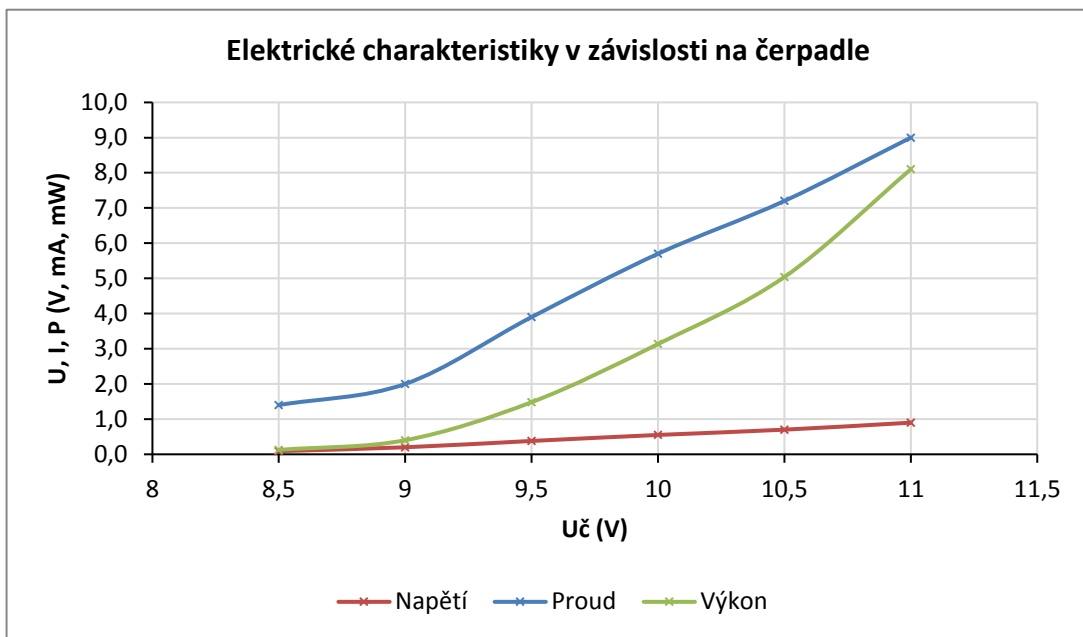
### 3.4 Grafy



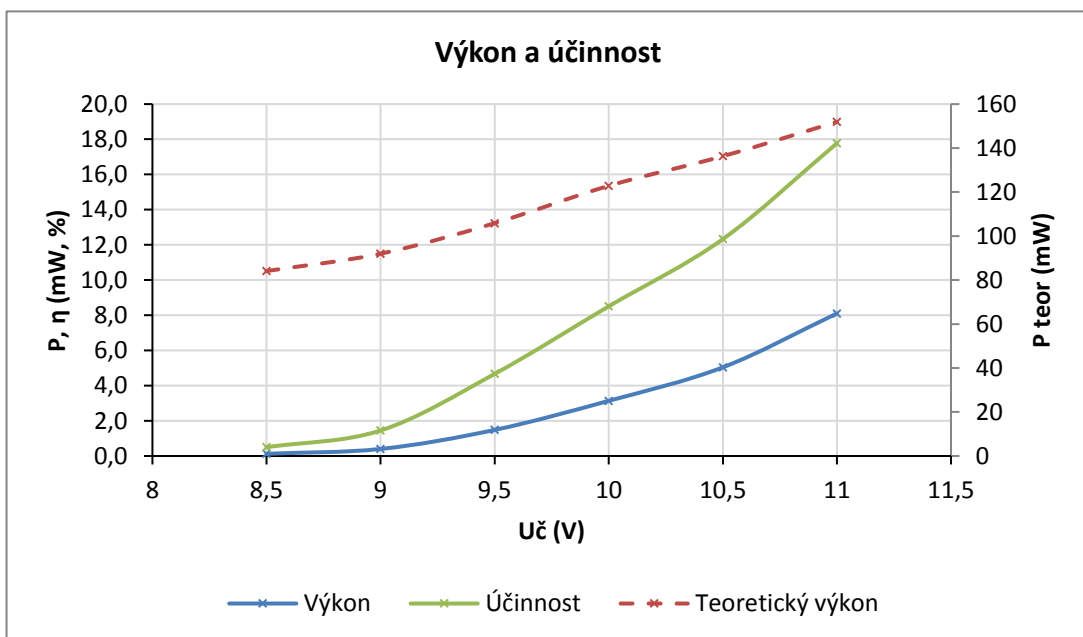
Graf 3.1: Parametry vodního toku v závislosti na pracovním bodě čerpadla



Graf 3.1: Měření napětí generátoru naprázdno



Graf 3.3: Měření proudu, napětí a výkonu na zátěži v závislosti na nastavení pracovního bodu



Graf 3.4: Graf výkonu, teoretického výkonu a účinnosti v závislosti na prostředí



## 4 Závěr

Bylo provedeno měření na Peltonově turbíně. Byl proměřen průtok generovaný čerpadlem v rozsahu napětí čerpadla od 6 V do 11,5 V s krokem 0,5 V, následně byly určeny další parametry prostředí a sice spád a teoretický výkon. Byl zkonstruován graf 3.1, který modeluje závislost spádu, průtoku a teoretického výkonu v závislosti na nastavení čerpadla.

Poté byla změřena charakteristika generátoru naprázdno. Turbína se začala otáčet při napětí čerpadla 8,5 V a charakteristika byla proměřena s krokem 0,1 V napětí čerpadla až do 11 V. Charakteristiku představuje graf 3.2, lze pozorovat lineární závislost.

Dále byla změřena výkonová charakteristika ve stejném rozsahu jako charakteristika naprázdno. Byl sestrojen graf 3.3, jež zobrazuje vývoj elektrických parametrů proudu, napětí a výkonu v závislosti na nastavení pracovního bodu. Lze pozorovat zejména velkou změnu proudu. Poté byla určena účinnost a byl sestrojen graf 3.4, který zobrazuje vývoj výkonu, teoretického výkonu a účinnosti. Lze pozorovat růst účinnosti až do 17,7 % v posledním pracovním bodě čerpadla, výkon na zátěži tedy roste rychleji než teoretický výkon. Malá účinnost je zároveň dána tím, že je pro výpočet použit hrubý spád a oběžné kolo je umístěno vysoko nad spodní hladinou.