

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Praktický model vodních motorů pomocí 3D tisku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Markéta KŘÍŽOVÁ**
Osobní číslo: **E15B0123P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Praktický model vodních motorů pomocí 3D tisku**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vysvětlete princip a funkci základních typů vodních motorů a jednotlivých typů vodních elektráren.
2. Uveďte přehled zajímavých vodních elektráren v ČR a ve světě a srovnajte jejich základní parametry.
3. Připravte modely zvolených vodních motorů pro tisk na 3D tiskárně.
4. Prakticky realizujte didaktický model vodní elektrárny s použitím vytvořených modelů vodních motorů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vodní elektrárny a motory. První část práce popisuje základní principy vodních elektráren. V další části jsou představeny významné vodní motory. Poté je věnována kapitola zajímavým světovým i českým elektrárnám. V poslední části se práce vysvětluje modelování vodních motorů pro 3D tisk. Byly vytvořeny didaktické modely vodních motorů.

Klíčová slova

Vodní energie, vodní elektrárna, vodní motory, turbína, vodní kolo, 3D tisk.

Abstract

This bachelor's thesis is focused on water power stations and water engines. First part of the thesis describes basic principles of water power stations. In the next part are introduced significant water engines. Next chapter describes interesting water power stations in the World and in the Czech Republic. The last part of the thesis deals with preparing and creating models of water engines for 3D print. Didactic models of the water engines was created.

Key words

Water energy, water power station, water engines, turbine, water wheel, 3D print.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 6.6.2018

Markéta Křížová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné připomínky a dále Ing. Davidu Rotovi, Ph.D. za pomoc při realizaci 3D tisku.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VODNÍ ENERGIE	11
1.1 POTENCIÁLNÍ ENERGIE	11
2 VODNÍ ELEKTRÁRNY	12
2.1 UMĚLÉ SOUSTŘEDĚNÍ SPÁDU.....	12
2.2 UMĚLÉ SOUSTŘEDĚNÍ PRŮTOKU	12
2.3 ROZDĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN.....	13
2.4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VODNÍCH ELEKTRÁREN.....	13
2.4.1 Spád a průtok.....	13
2.4.2 Výkon a účinnost.....	13
2.5 TYPY VODNÍCH ELEKTRÁREN	14
2.5.1 Přehradní elektrárna	14
2.5.2 Jezová elektrárna.....	15
2.5.3 Derivační elektrárna.....	15
2.5.4 Přehradně-derivační elektrárna	16
2.5.5 Přečerpávací elektrárna	17
2.5.6 Přílivová elektrárna.....	18
3 VODNÍ MOTORY	19
3.1 TURBÍNY	19
3.1.1 Dělení podle přenosu energie.....	19
3.1.2 Dělení podle polohy hřídele.....	20
3.1.3 Dělení podle měrné energie.....	20
3.1.4 Dělení podle průtoku oběžným kolem.....	21
3.1.5 Dělení podle vstupní části turbíny	21
3.1.6 Základní parametry turbín.....	22
3.1.7 Francisova turbína	25
3.1.8 Kaplanova turbína.....	28
3.1.9 Reiffensteinova turbína.....	30
3.1.10 Peltonova turbína	32
3.1.11 Turgo turbína.....	34
3.1.12 Bánkiho turbína	35

3.1.13	Šneková turbína (Archimédův šroub)	37
3.1.14	Savoniova turbína.....	38
3.2	VODNÍ KOLA	39
3.2.1	Rozdělení vodních kol.....	40
3.2.2	Lopatková kola	40
3.2.3	Korečková kola.....	43
4	ZAJÍMAVÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	45
4.1	TŘI SOUTĚSKY	45
4.2	ITAIPU	46
4.3	BATH COUNTY PUMPED STORAGE STATION	47
4.4	JINPING- I	48
4.5	DLOUHÉ STRÁNĚ	49
4.6	DALEŠICE	50
4.7	ORLÍK.....	51
4.8	POROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ.....	52
4.8.1	Přečerpávací.....	52
4.8.2	Akumulační.....	53
4.8.3	Světová a česká prvenství	53
5	PŘÍPRAVA MODELŮ PRO 3D TISK A REALIZACE	54
5.1	3D TISK	54
5.2	AUTOCAD	54
5.2.1	AutoCAD uživatelské rozhraní	55
5.2.2	Lišty záložek.....	55
5.3	MODEL VODNÍHO KOLA.....	57
5.4	MODEL PELTONOVY TURBÍNY	59
5.5	MODEL PROPELEROVÉ TURBÍNY	61
5.6	MODEL FRANCISOVY TURBÍNY	67
	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	71
	PŘÍLOHY	A

Úvod

Energetika je nedílnou součástí každodenního moderního života, a tak se snažíme přijít s různými způsoby, jak energii získat. V současnosti se energetika zaměřuje na výrobu energie z obnovitelných zdrojů, které jsou vhodnější z hlediska ekologického a environmentálního. Velmi významným obnovitelným zdrojem je voda. Problém vodní energie je v dostupnosti. Státy, které nemají významné toky, nebo velké zásoby vody, nemohou tuto energii uspokojivě využívat. Vodní energie je také závislá na aktuálním množství vody v daném systému. Vodní elektrárny tedy nemohou nahradit konvenční, ale mohou je doplňovat a fungovat v souladu s nimi.

Práce je dělena do pěti kapitol. V první kapitole se věnuje odvození vodní energie. Druhá kapitola je zaměřena na popis principů vodních elektráren, jejich rozdělení a využití. Vodní elektrárna přeměňuje vodní energii pomocí vodních motorů, kterým se věnuje třetí kapitola. Jsou zde popsány základní typy vodních motorů ve dvou podkapitolách, a sice vodní kola a turbíny. V rámci těchto podkapitol jsou představeny významné druhy, jejich princip, konstrukční aspekty a využití. Čtvrtá část představuje přehled zajímavých vodních elektráren ve světě i v Česku a porovnává je. Světové elektrárny jsou vybrány s ohledem na jejich významné parametry a jsou porovnány s jejich českými ekvivalenty. V poslední, praktické části je popisován způsob přípravy didaktického modelu vodních motorů. Motory jsou realizovány pomocí 3D tiskových technologií. Jejich modely byly vytvořeny v programu počítačem podporovaného modelování AutoCAD. Kapitola také stručně popisuje základ práce v tomto programu.

Seznam symbolů a zkratek

A	teoretická zásoba vodní energie [W]
C	střední rychlost proudění [m/s]
CAD.....	computer aided design
E.....	měrná energie [J/kg]
f.....	frekvence [Hz]
g	gravitační zrychlení [m/s]
H	výškový rozdíl [m]
M.....	hmotnost [kg]
n	asynchronní otáčky [ot./min]
n_s	synchronní otáčky [ot./min]
p	počet polpárů
P	výkon [W]
p_{man}	přetlak [Pa]
Q	množství kapaliny [$m^3 \cdot s^{-1}$]
s.....	skluz
η	účinnost
ρ	měrná hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$]

1 Vodní energie

Voda je v přírodě nositelem tří druhů energií: mechanické, tepelné a chemické [1, 2]. Z hlediska technického využití je nejzajímavější energie mechanická, která je neustále obnovována koloběhem vody [2]. Tuto energii můžeme najít ve formě potenciální, nebo ve formě kinetické [2].

1.1 Potenciální energie

Potenciální energii můžeme odvodit ze základních fyzikálních poznatků. Proteče-li každou sekundu množství Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) kapaliny o měrné hmotnosti ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) výškovým rozdílem H (m), koná práci, neboli odevzdá výkon P (W) [2, 3].

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

Rovnice (1.1) nám říká, že 1 kg kapaliny změní svoji energii o hodnotu $E=g \cdot H$, tato energie je vztažena na jednotku hmotnosti, proto se nazývá měrnou energií [2, 3]. Přesun kapaliny probíhá v reálném čase, vykonané práci tedy odpovídá výkon P dle vzorce (1.1) [2, 3]. Výkony se počítají pro dvě hodnoty průtoků, a sice $Q_{50\%}$ (střední průtok s 50% pravděpodobností překročení) a $Q_{95\%}$ (minimální průtok s 95% pravděpodobností překročení) [2, 3]. Teoretickou zásobu (dle [3]) vodní energie za den můžeme stanovit jako:

$$A = 3600 \cdot 24 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \quad (1.2)$$

Teoretickou zásobu (1.2) nemůžeme využít celou, protože není možné bezztrátové využití energie toku [2, 3]. Musíme uvažovat ztráty hydraulické, objemové, ztráty při převodu mechanické energie na elektrickou, dále omezení vlivem podmínek hydrologických, geologických, topografických [2, 3].

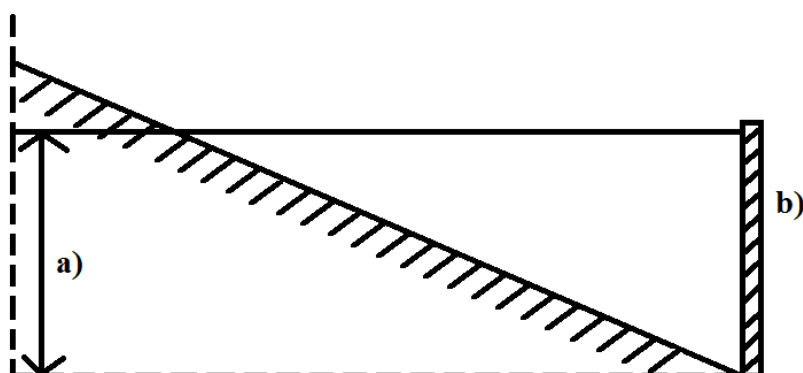
2 Vodní elektrárny

Abychom mohli efektivně využít vodní energii, musíme uměle soustředit průtok a spád [1, 2]. Budování vodních děl obnáší stavební zásah v lokalitě plánované vodní elektrárny [2].

2.1 Umělé soustředění spádu

Umělého soustředění spádu můžeme dosáhnout [1, 2]:

- výstavbou jezu nebo přehrady (viz obr. 2.1)
- odvodem vody derivačním kanálem
- využitím přílivu a odlivu moře



Obr. 2.1: soustředění spádu přehradou a) soustředěný spád H , b) přehrada (překresleno z [2])

2.2 Umělé soustředění průtoku

Průtok lze uměle soustředit:

- soustředěním vody ve vlastním povodí
- převedením vody z jiného povodí
- umělým přečerpáváním vody a její akumulací

2.3 Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny můžeme rozdělit podle jejich instalovaného výkonu na malé elektrárny (MVE) s výkonem do 10 MW, střední elektrárny s výkonem do 200 MW a velké elektrárny s výkonem nad 200 MW [1, 2].

Dále lze vodní elektrárny dělit dle využívaného spádu na nízkotlaké se spádem do 20 m, středotlaké se spádem mezi 20 a 100 m, a vysokotlaké se spádem nad 100 m [4].

Další způsob dělení může být podle využití vodního toku na průtočné vodní elektrárny, jezové vodní elektrárny, derivační elektrárny, přečerpávací vodní elektrárny, přehradní vodní elektrárny a přehradně derivační elektrárny [2, 4].

2.4 Základní parametry vodních elektráren

2.4.1 Spád a průtok

Spád H můžeme charakterizovat jako výškový rozdíl hladin nad a pod vodním dílem [3], viz kapitola 1.1, vzorec (1.1), označeno jako H . V souvislosti s vodními motory nás zajímá užitečný spád, který lze charakterizovat jako celkový spád elektrárny po odečtení hydraulických ztrát [1].

Průtok Q je množství kapaliny, které proteče průřezem o známém tvaru a rozměrech za čas [3], viz kapitola 1.1, vzorec (1.1), označeno jako Q .

2.4.2 Výkon a účinnost

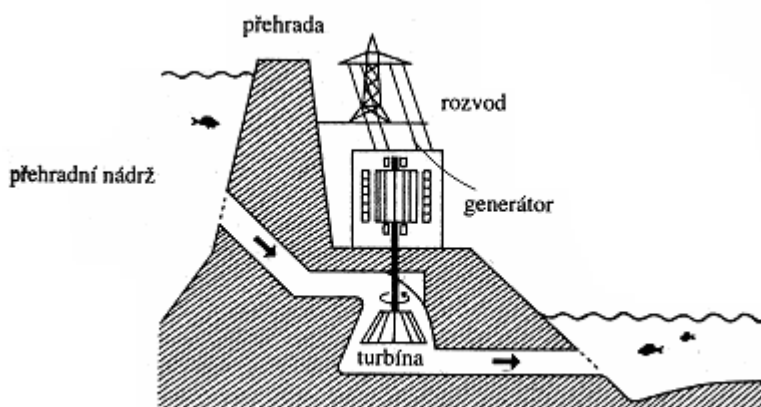
Celkový výkon elektrárny P dle (2.1) je určen zejména spádem H , průtokem Q a účinností přeměny η mechanické energie na elektrickou, zejména účinností vodního motoru. Výkon lze definovat pomocí vzorce:

$$P = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \quad (2.1)$$

2.5 Typy vodních elektráren

2.5.1 Přehradní elektrárna

Principem přehradní elektrárny (obr. 2.2) je přehradit vodní tok hrází, která zadržuje vodu, a tak tvoří její zásobu [5]. Tyto elektrárny jsou snadno regulovatelné, lze je tedy použít k pokrytí výkonových špiček [5]. Samotná přehrada chrání území před povodněmi zadržováním vody, a naopak v době sucha slouží jako vodní zásobárna pro zavodňování území, napájení vodovodů [5]. Podle účelu lze rozlišovat přehrady jako ochranné (chránící před záplavou) a užitkové (udržující zásobu vody) [2, 5]. Přehrady se ideálně konstruují tak, aby sloužily oběma účelům [2, 5]. V případě této víceúčelové přehrady rozdělujeme nádrž na tři prostory, a sice na prostor ochranný, který částečně zadržuje velké vody, dále na prostor užitečný, který zajišťuje akumulaci vody a prostor stálý, který slouží k doplnění vody do řek v době sucha [2, 5].



Obr. 2.2: Přehradní elektrárna (převzato z [6])

Vtok k turbínám vodní elektrárny je umístěn pod dolní hladinou užitečného prostoru, strojovna s vodním motorem je umístěna buď pod přehradou u vzdušné paty přehrady, nebo pod přelivy u paty přehrady, případně částečně nebo zcela v přehradním tělese [2, 7].

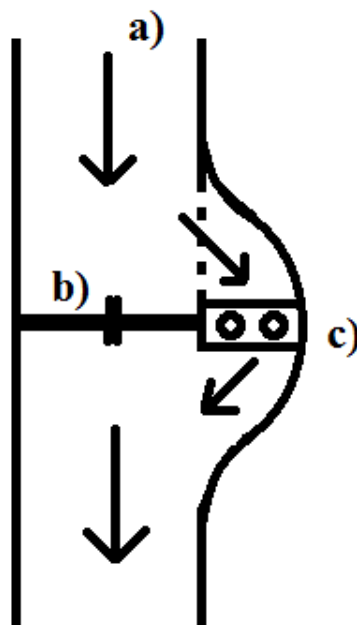
Přehradní vodní elektrárny s přehradou, která vytváří spád do 100 m, nazýváme středotlaké, pro spády vyšší používáme označení vysokotlaké [7].

Vzhledem k rozloze stavby musíme brát v úvahu veliký zásah do přírody (stále však menší dopad než v případě uhelné, která ke svému fungování potřebuje i velký uhelný důl, systém dopravy uhlí) jak z hlediska estetického, tak z hlediska životního prostředí.

Vybudování hráze vyžaduje zatopení celého údolí, je třeba sledovat ekologické dopady na lokální ekosystém a zamezit ovlivnění vodních živočichů.

2.5.2 Jezová elektrárna

Stejně jako u přehradní elektrárny je zde principem přehradit vodní tok umělou překážkou, čímž ovlivňujeme spád a průtok [2, 8]. Oproti přehradě je jez menších rozměrů, jedná se o elektrárny nízkotlaké [2, 8]. Jezové elektrárny můžeme realizovat jako břehové (obr. 2.3), buď u jednoho, nebo u obou břehů, dále lze budovat elektrárny pilířové (umístěné v pilířích jezu), případně podpřelivové [2, 8]. Jezové elektrárny nevyžadují specifickou lokalitu jako přehradní, což je dáno rozměry stavby, teoreticky každá vesnice u toku může mít vlastní jez. Budování jezů má neblahý dopad na vodní faunu, je třeba řešit migraci vodních živočichů, např. pomocí rybích přechodů [8].

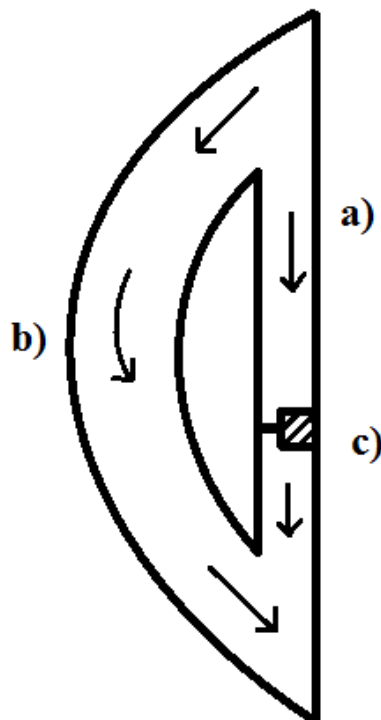


Obr. 2.3: Jezová elektrárna břehová, a) tok, b) jez, c) strojovna elektrárny (překresleno z [2])

2.5.3 Derivační elektrárna

Derivační elektrárna (obr. 2.4) využívá k soustředění spádu tzv. derivační kanál, neboli odklonění části toku [1, 2]. V derivačním kanálu se snažíme dosáhnout vyššího spádu, než jaký je v původním toku, čehož dosáhneme například zkrácením oblouku řeky, nebo vedením kanálu do jiného níže položeného toku [1, 2, 9]. Provedení odklonu toku může být formou kanálu, potrubí nebo štoly [2]. Voda může být do elektrárny přiváděna

beztlakově, nebo pod tlakem [1]. Je zde využit jez jako vzdouvací zařízení, nevytváří však spád, ale pouze přivádí vodu do derivace [1, 8].



Obr. 2.4: derivační elektrárna, a) derivační kanál, b) původní tok, c) elektrárna (překresleno z [2])

Díky tomu, že není třeba přehradit původní tok, tato elektrárna neovlivňuje migraci vodních živočichů. Vybudování je náročnější na stavební úpravy kvůli odklonění.

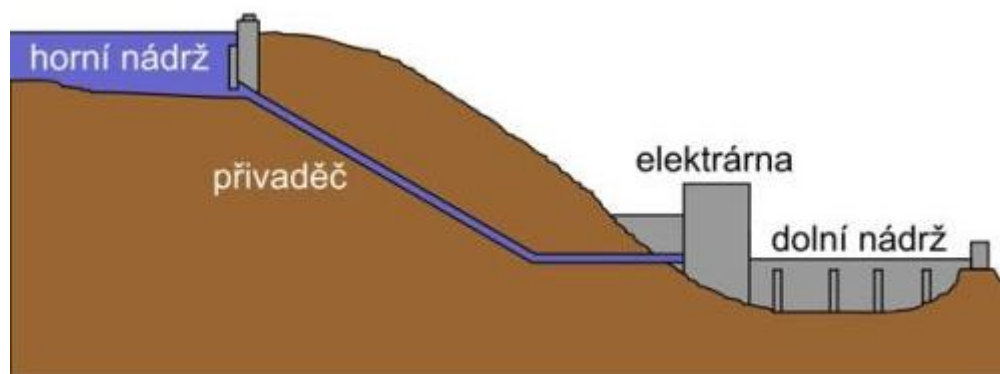
2.5.4 Přehradně-derivační elektrárna

Přehradně-derivační elektrárny v sobě, jak již název napovídá, kombinují principy přehradní a principy derivační [1, 2]. Využívá se zde přehradu jako vzdouvacího zařízení, které zde plní funkci soustředění spádu a průtoku a zároveň svádí vodu do derivačního odklonu [1, 2]. Na rozdíl od čistě derivačních elektráren je zde derivace vždy tlaková [1]. Tlakový přivaděč slouží ke zvýšení spádu, nádrž se využívá k regulaci odtoku a akumulaci vody [1]. Tyto elektrárny jsou často provedeny jako podzemní [1, 2]. Provedení derivace může být podobně jako u derivačních elektráren vedeno podél toku, zkracovat oblouk řeky, nebo převádět vodu z výše položeného toku do níže položeného [1].

2.5.5 Přečerpávací elektrárna

Přečerpávací vodní elektrárny (obr. 2.5) primárně slouží k akumulaci energie a využívají se k pokrytí výkonových špiček [10]. Elektrárna ke své činnosti využívá dvou nádrží, jedné vysoko položené, která slouží k akumulaci potenciální energie vody a druhé dolní nádrže [1, 2, 10]. Provedení horní nádrže může být dvojího druhu, buď se jedná o čistě sekundární akumulaci, taková nádrž nemá přirozený přítok a z pravidla je vybudována na kopci, nebo se jedná o smíšenou akumulaci, taková nádrž je vytvořena pomocí přehrady [1, 2]. V režimu výroby elektrické energie se využije potenciálu vody v horní nádrži, kterou přepustíme přes turbínu do dolní nádrže [1, 10]. Pokud není potřeba pokrývat výkonovou špičku, přečerpává se voda naopak z dolní nádrže do horní a elektrárna tak mění elektrickou energii zpět na potenciální, chová se tedy jako elektrický spotřebič [1, 10].

Elektrárny se sekundární akumulací mohou být řešeny dvěma způsoby [1]. První a nejčastěji používaný způsob je, že horní nádrž je na kopci a dolní v údolí, elektrárna pak může být umístěna nad zemí údolní nádrže, nebo být situována v podzemí [1]. Druhá možnost je umístit dolní nádrž i elektrárnu pod zem, což se provádí jen ve velmi výjimečných případech [1].



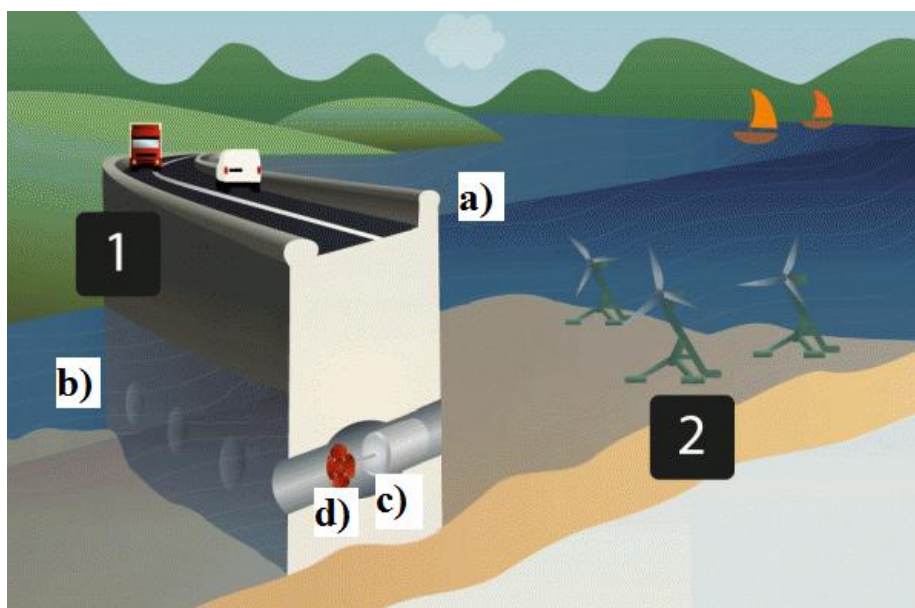
Obr. 2.5: přečerpávací elektrárna, převzato z [11]

Elektrárny se smíšenou akumulací se budují ve spojení s přehradní, derivační vodní elektrárnou nebo přehradně-derivační [1]. Nejčastější způsob provedení je vybudování vyrovnávací nádrže pod přehradou s vodní elektrárnou odkud se voda přečerpává do horní nádrže [1].

První přečerpávací elektrárny používaly systém čtyř strojů, a sice čerpadla poháněného motorem, turbíny a alternátoru [2]. Nejmodernější variantou je systém dvou strojů, kde nalezneme turbínu, která zároveň může fungovat jako čerpadlo a je připojena k alternátoru, který lze provozovat v režimu motoru [2].

2.5.6 Přílivová elektrárna

Přílivové elektrárny (obr. 2.6) využívají energii změn hladiny moře [12]. Měsíc společně se sluncem působí gravitační silou na zemi, čímž dochází k pravidelné změně hladiny moří, což nazýváme přílivem nebo odlivem [12, 13]. V místech s dostatečně rozdílnou hladinou (dáno rozdílnou hloubkou moře, tvarem pevnin, ostrovy) lze budovat slapovou elektrárnu [12, 13]. Rozlišujeme dva typy elektráren, první možností je přehrazení zálivu, druhou možností je budování turbín přímo na dně moře [12, 13]. U přehradního typu je hráz provrtána otvory, ve kterých jsou turbíny s generátory [12]. Vodní plocha za přehradou se nazývá přílivová laguna, rozdíl hladin moře a přílivové laguny tvoří spád. Ideálně přílivové elektrárny pracují při přílivu i odlivu [12].



Obr. 2.6: Přílivová elektrárna, 1) přehrazení zálivu, 2) turbíny na dně moře, a) moře, b) přehrada, c) motor, d) turbína, převzato z [12]

3 Vodní motory

Abychom mohli využít energii vody, musíme ji změnit na mechanickou energii otáčející se hřídele, nebo energii pohybujícího se pístu, tyto dvě energie lze dále využít generátorem pro změnu na elektrickou energii [2]. K přeměně vodní energie slouží vodní motor, rozlišujeme dva druhy rotačních motorů, a sice vývojově starší vodní kola (vrchol v minulém století) a vývojově mladší vodní turbíny [2].

3.1 Turbíny

Turbíny jsou v současnosti nejvyužívanější kategorií vodních motorů, přeměna energie probíhá na oběžném kole, které využívá kinetickou energii (rovnotlaké turbíny), nebo i částečně tlakovou energii (přetlakové turbíny) [2]. Turbíny se vyrábějí v různých typech, rozměrech, výkonech, dle potřeb místa, kde budou instalovány [2].

Turbíny můžeme dělit podle:

- způsobu přenosu energie
- průtoku vody oběžným kolem
- polohy hřídele
- měrné energie a výkonu
- vstupní části turbíny

3.1.1 Dělení podle přenosu energie

Podle přenosu energie rozlišujeme turbíny přetlakové, rovnotlaké a mezní [2].

Pokud je část tlakové měrné energie přeměněna v kinetickou měrnou energii v přivaděči k oběžnému kolu a zbylá část tlakové měrné energie je přeměněna v kinetickou měrnou energii při průchodu oběžným kolem, nazýváme takovou turbínu přetlakovou

(přeměňuje kinetickou i tlakovou energii na mechanickou) [1, 2]. Průtok oběžným kolem je vyvolán působením přetlaku na vstupu [1, 2].

Pokud se veškerá tlaková měrná energie mění v kinetickou měrnou energii v přivaděči k oběžnému kolu, lze pozorovat na vstupu k oběžnému kolu i na výstupu z něj stejný tlak a turbínu pak označujeme jako rovnotlakou (přeměňuje pouze kinetickou energii na mechanickou) [1, 2].

Mezní turbína tvoří přechod mezi přetlakovými a rovnotlakými turbínami, dnes již nevyužívané [2]. Mezní turbína je vlastně rovnotlaká turbína, která má kanály oběžného kola tvořeny tvarovými lopatkami [2].

3.1.2 Dělení podle polohy hřídele

Podle [2] turbíny můžeme rozdělit podle polohy hřídele na:

- horizontální
- vertikální
- šikmé

3.1.3 Dělení podle měrné energie

Podle [2] můžeme turbíny rozdělit podle měrné energie na:

- nízkotlaké - $E < 200 \text{ J/kg}$
- středotlaké - $E < 1000 \text{ J/kg}$
- vysokotlaké - $E > 1000 \text{ J/kg}$

3.1.4 Dělení podle průtoku oběžným kolem

Podle [2, 3] turbíny můžeme podle průtoku oběžným kolem rozdělit do osmi kategorií:

- centrifugální turbína - vnitřní vtok, voda protéká oběžným kolem směrem od hřídele (radiálně odstředivá)
- centripetální turbína - vnější vtok, voda protéká oběžným kolem směrem k hřídeli (radiálně dostředivá)
- axiální turbína - voda protéká oběžným kolem v přibližně stejné vzdálenosti
- radiálně axiální turbína - voda proudí oběžným kolem nejprve radiálně a poté změni směr na axiální
- diagonální turbína - voda protéká oběžným kolem šikmo ke hřídeli
- turbína se šikmým průtokem - voda vstupuje na lopatky oběžného kola z boční strany a vystupuje v osovém směru
- tangenciální turbína - voda vstupuje na lopatky oběžného kola v tečném směru ke kružnici se středem v ose rotace kola
- turbína s dvojitým průtokem - voda vstupuje do oběžného kola dostředivě a vystupuje odstředivě

3.1.5 Dělení podle vstupní části turbíny

Podle vstupu do turbíny můžeme dělit na turbíny spirální, kašnové, kotlové, násoskové, a přímoproudé [2].

3.1.6 Základní parametry turbín

3.1.6.1 Průtok turbínou

Průtok turbínou lze charakterizovat jako množství kapaliny (včetně nevyužité vody protékající mezerami mimo turbínu) protékající turbínou za jednotku času [1, 3]. Průtoky můžeme rozlišovat ze dvou hledisek, a sice z hlediska vodohospodářského řešení a z hlediska průtoku vodním strojem [1].

Z vodohospodářského hlediska rozlišujeme nejmenší (Q_{\min}) využitelný a největší (Q_{\max}) využitelný průtok ve sledovaném období, tyto dvě hodnoty lze porovnávat s nejmenším (Q'_{\min}) využitým a největším (Q'_{\max}) využitým průtokem ve stejném období [1]. Podobnou dvojicí průtoků je roční využitelný a roční využitý průtok za sledované období [1].

Z hlediska průtoku vodním strojem rozlišujeme [1]:

- průtok turbínou - celkový průtok včetně nevyužité vody
- **jmenovitý průtok** - průtok při jmenovitých otáčkách jmenovité měrné energii (jmenovité hodnoty určují stav kdy má turbína maximální možnou účinnost)
- hltnost turbíny - největší možný průtok vztažený ke konkrétnímu spádu
- jmenovitá hltnost - největší možný průtok při jmenovitém spádu

3.1.6.2 Měrná energie turbíny

Měrnou energii lze definovat jako rozdíl měrných energií kapaliny na vstupu turbíny a na jejím výstupu, pracujeme se jmenovitou měrnou energií (maximální účinnost) [3]. Dle způsobu přenosu energie na oběžné kolo rozlišujeme turbíny přetlakové a rovnotlaké (viz kapitola 3.1). Měrná energie turbíny je vždy nižší, než měrná energie vodního díla [2, 3].

Měrnou energii přetlakových turbín lze určit podle rovnice [1]:

$$E = g \cdot h + 0.5 \cdot (c_1^2 - c_2^2) \quad (3.1)$$

kde g je tíhové zrychlení, h svislá vzdálenost mezi vstupem přetlakového potrubí a výstupním kanálem, c_1 je střední rychlost proudění ve vstupním průřezu, c_2 je střední rychlost proudění v posledním plně využitém průřezu.

Měrnou energii rovnotlakých turbín lze určit podle rovnice [3]:

$$E = p_{man} \cdot \rho^{-1} + 0.5(c_1^2 - c_2^2) \quad (3.2)$$

kde p_{man} je přetlak, c_1 je střední rychlost proudění ve vstupním průřezu, c_2 je střední rychlost proudění v posledním plně využitém průřezu.

3.1.6.3 Otáčky turbíny

Provozní otáčky turbíny jsou určeny hydraulickým a konstrukčním řešením turbíny a jsou podřízeny použitému generátoru [2, 3]. Při použití synchronního generátoru a přímém spojení turbíny s generátorem můžeme určit otáčky dle vztahu [2, 3]:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (3.3)$$

kde f je frekvence sítě, a p je počet polpárů.

V případě použití asynchronního generátoru (často u MVE) je třeba uvažovat skluz (s), který je definován jako rozdíl otáček točivého pole (n_s) a otáček na hřídeli (n) v poměru k otáčkám točivého pole. Skluz je charakterizován rovnicí [2, 3]:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.4)$$

Turbínu a generátor lze spojit pomocí převodu, otáčky turbíny pak nejsou rovny otáčkám generátoru na hřídeli.

3.1.6.4 Výkon turbíny

Teoretický výkon turbíny P_t lze definovat vztahem (3.5), kde Q je průtok turbínou, ρ hustota kapaliny, g gravitační konstanta, H výškový rozdíl [1, 2].

$$P_t = E \cdot Q \cdot \rho = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (3.5)$$

Mechanický výkon P odebíráme na hřídeli turbíny a je nižší než teoretický, z důvodu ztrát při přeměně hydraulické energie na mechanickou [1, 2]. Je dán vztahem (3.6), kde η je účinnost přeměny, P_t je teoretický výkon turbíny [1, 2].

$$P = P_t \cdot \eta \quad (3.6)$$

Rozlišujeme dále jmenovitý výkon, který je definován jmenovitou měrnou energií a jmenovitými otáčkami [2, 3]. Instalovaný výkon je maximální možný výkon při ideálních podmínkách (dosažení maximální účinnosti) [2].

3.1.6.5 Energetická bilance

V turbínách rozlišujeme tři druhy ztrát, objemové, hydraulické a mechanické [2]. Tyto ztráty nám definují účinnost vodního motoru ve vztahu (3.6) [2].

Část vody neprotéká oběžným kolem turbíny, ale uniká například netěsnostmi [2, 3]. Pokud celkové množství vody protékající turbínou označíme Q a množství vody unikající netěsnostmi označíme Q_z , lze určit množství, které protéká oběžným kolem jako rozdíl Q a Q_z [2, 3]. Objemové ztráty nám určují objemovou účinnost, kterou lze spočítat jako (3.7) [2, 3].

$$\eta_Q = \frac{Q - Q_z}{Q} = 1 - \frac{Q_z}{Q} \quad (3.7)$$

K hydraulickým ztrátám dochází na obtékaných plochách průtočného prostoru turbíny, dále místními ztrátami v důsledku změny směru proudění, nebo změny průřezu průtoku [2, 3]. Dále zahrnujeme ztráty rázem, způsobené nesprávným vstupem kapaliny do lopatek [2, 3]. Hydraulické ztráty jsou způsobeny vazkostí¹ kapaliny [2, 3]. Hydraulické ztráty můžeme vyjádřit pomocí hydraulické účinnosti, dle vzorce (3.8), kde P_h je výkon převedený na lopatky, P_t je teoretický výkon (3.5) a E_z je ztracená měrná energie v důsledku hydraulických ztrát [2, 3]. Energie převedená na lopatky je určena rozdílem celkové energie E a ztracené energie E_z .

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_t} = \frac{E - E_z}{E} \quad (3.8)$$

Mechanické ztráty jsou způsobeny třením v ložiscích, třením kapaliny o povrch oběžného kola, třením v ucpávce hřídele [2, 3]. Označíme-li výkon ztracený mechanickými ztrátami jako P_z , můžeme definovat mechanickou účinnost vztahem (3.9) [2, 3].

$$\eta_m = \frac{P}{P_h} = \frac{P_h - P_z}{P_h} = 1 - \frac{P_z}{P_h} \quad (3.9)$$

Z výše uvedených rovnic můžeme stanovit celkovou účinnost turbíny dle vztahu (3.10) [2, 3].

$$\eta = \eta_Q \cdot \eta_h \cdot \eta_m \quad (3.10)$$

3.1.7 Francisova turbína

Francisova turbína je pojmenována podle J. B. Francise, který vylepšil doposud používané typy turbín² a zvýšil jejich účinnost [7]. Řešení J. B. Francise pochází z roku 1849 a jedná se o nejdéle využívaný typ moderní turbíny [2]. Základním znakem Francisových turbín je oběžné kolo, které tvoří náboj na hřídeli, vnější věnec a pevné lopatky spojující náboj s vnějším věncem [2, 8]. Regulace probíhá pomocí natáčivých

¹ Vazkost, jinak také viskozita, je mírou tření při laminárním proudění

² Francisova turbína vychází z vynálezu Benoita Fourneyrona z roku 1826

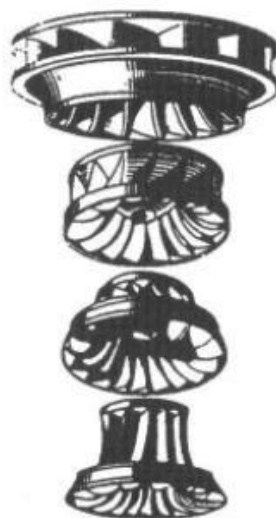
rozdávěcích lopatek v rozvaděči, kterým lze regulovat či zcela uzavřít přívod vody k oběžnému kolu [2]. Přívod vody do rozvaděče se řeší spirálovým uspořádáním, pro menší výkony kašnovým, z oběžného kola je voda odváděna přes savku [14]. Francisovu turbínu lze použít jako čerpadlo [2].

3.1.7.1 Princip činnosti

Francisovu turbínu řadíme mezi přetlakové turbíny, podle průtoku oběžným kolem mezi radiálně axiální [2, 14]. Rotor a rozvaděcí lopatky jsou umístěny mezi dvěma víky [14]. Voda vstupuje k oběžnému kolu přes tlakové potrubí, které se postupně zužuje, nebo pro menší spády je použita kašna (často u MVE) [14]. Regulovatelné rozvaděcí lopatky směřují vodu na rotor [14]. Po vstupu do oběžného kola protéká voda mezi lopatkovými kanály, kde odevzdává svojí energii [7]. Voda je z oběžného kola odváděna savkou, ve které se vytváří podtlak, který pak působí na odtokovou stranu oběžného kola [2, 7, 14].

3.1.7.2 Konstrukční řešení

Oběžné kolo s lopatkami může být odlito z jednoho kusu, nebo tvořeno lopatkami zalitými do kotouče a věnce kola [14]. Oběžné kolo se vyrábí v různých tvarech v závislosti na rychloběžnosti (obr. 3.1) [3, 14].



Obr. 3.1: různé tvary oběžného kola Francisovy turbíny (převzato z [1])

Kolo, které je tvořeno nábojem, věncem a lopatkami, je uloženo na průchozím hřídeli [2]. Pro snížení objemových ztrát je na věnci i náboji válcová těsnicí plocha, která ve spojení s plochami na víku a dolním lopatkovém kruhu tvoří těsnicí spáru [2]. Víka jsou spojeny čepy, na kterých jsou uloženy rozváděcí lopatky, které lze regulovat pomocí tahálek regulačního kruhu, který je ovládán táhly spojenými s regulačním srdcem [2]. Rozváděcí lopatky přivádějí vodu rovnoměrně po celém obvodu turbíny radiálním směrem, z turbíny pak voda vystupuje směrem axiálním [2, 14].

Rozlišujeme horizontální a vertikální uložení, přívod vody je často spirálou, pro MVE se řeší jako kašnové [2, 14].

Francisova kašnová horizontální turbína se používá pro malé spády od 2 do 8 metrů [15]. Hlavní výhodou horizontálního uložení je vodorovný hřídel, který vede přímo do strojovny, což zjednodušuje převodování [15]. Turbína se umísťuje do stěny kašny [15]. Po výstupu z turbíny je voda odváděna kolenovou savkou, která může být v tzv. suchém, nebo mokřém provedení, podle toho, zda je umístěna uvnitř kašny, nebo vedena strojovnou [15].

Francisova kašnová vertikální turbína je umístěna na dně kašny, hřídel je vyvedena vzhůru do strojovny umístěné nad turbínou [16].

3.1.7.3 Užití

Velké Francisovy turbíny se používají pro velké spády a pro střední až velké průtoky, často je najdeme v přečerpávacích elektrárnách kvůli možnosti reverzního provozu [1, 7].

Dříve se Francisovy turbíny používali také v MVE, vertikální turbína na spádech od 1 m do cca 5 m při středním průtoku, horizontální turbíny se historicky používaly jako pohon mlýnů, nebo pil a časem byly přebudovány na MVE [7].

3.1.8 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína (obr. 3.2) je přetlaková, axiální, vznikla vylepšením vrtulové turbíny prof. Kaplana v roce 1919 [2, 17]. Prof. Kaplan při návrhu počítal s vazkostí vody a zdokonalil lopatky oběžného i rozváděcího kola, aby byly otáčecí [2, 17]. Kaplanova turbína, je tedy turbína s dvojitou regulací, čímž dosahuje vysoké účinnosti pro velké rozmezí průtoků [2, 17]. Lopatky oběžného kola jsou přes čepy otočně upevněny na náboj, mezi osou lopatek a osou náboje je úhel 90° , uvnitř náboje nalezneme zařízení, které slouží pro natáčení lopatek a je poháněno hydraulicky, pro malé stroje mechanicky (př. šroubový převod) [2].

3.1.8.1 Princip činnosti

Přívod vody je řešen spirálou, nebo kašnou, přivedená voda prochází skrz regulovatelné lopatky rozváděcího kola do kola oběžného [2]. Oběžným kolem voda prochází axiálně, lopatky oběžného kola lze také regulovat [2]. Voda z oběžného kola je odváděna savkou [2].



Obr. 3.2: Kaplanova turbína Orlik (převzato z [18])

3.1.8.2 Konstrukční řešení

Velké Kaplanovy turbíny se instalují vertikálně, menší stroje mohou být horizontální, nebo dokonce se šikmou osou, podle potřeb stavby [2]. Rozlišujeme několik odvozených konstrukcí kaplanovy turbíny, a sice propelerová, Thomannova a neregulovatelná axiální turbína [2].

Ve srovnání s Francisovou turbínou dosahuje Kaplanova většího jednotkového průtoku a vyšších měrných otáček, a tak pro turbíny srovnatelných parametrů bude Kaplanova menší a lehčí [2]. Kaplanova turbína má vysoký kavitační součinitel a je tedy třeba konstrukčně zabránit vzniku kavitace, například použitím oběžných lopatek z korozivzdorných materiálů, které jsou odolné proti kavitačnímu opotřebení [2, 14]. Po odlití lopatky se list čistě opracuje a vyhladí kvůli snížení ztrát třením a také kvůli zvýšení kavitační odolnosti [14].

3.1.8.2.1 Odvozené konstrukce

Z důvodu dvojité regulace je Kaplanova turbína technicky složitá a dražší, proto byly snahy o vytvoření levné turbíny, propelerová turbína vychází z Kaplanovy, ale má lopatky oběžného kola pevné a reguluje se tedy pouze rozváděcími lopatkami [2]. K oběžnému kolu jsou lopatky připojeny nerozebíratelně (jedná se o jeden odlitek), nebo jsou připojeny šroubem, takové spojení lze rozebrat a podle užití nastavit náklon lopatek [2]. Účinnost propelerové turbíny je více závislá na změně průtoku, než Kaplanovy [2].

Druhou odvozenou variantou je Thomannova turbína, která je regulovaná lopatkami oběžného kola, rozvaděč má naopak pevný [2, 19]. Konstrukčně je složitější, než propelerová, proto je také dražší, nicméně dosahuje lepší účinnosti v provozním rozsahu průtoků [19]. Kvůli pevnému rozvaděči nelze zcela uzavřít přívod vody a oběžnými lopatkami z hlediska jejich geometrie nelze dosáhnout uzavření kola [19]. Abychom mohli turbínu odstavit, umísťuje se v přívodu rychlouzávěr [19].

Nejjednodušší a nejlevnější variantou je axiální neregulovatelná turbína, která má pevné lopatky oběžného kola i rozvaděče, proto ji nelze účinně regulovat a najde využití hlavně na místech s konstantním průtokem [19].

3.1.8.3 Užití

Kaplanovy turbíny jsou vhodné pro velké průtoky a malé spády, průtoky mohou být od 0.15 až po desítky m^3/s , spády od 1 m až do cca 50 m, existují i modely fungující na spádech větších [7, 14].

3.1.9 Reiffensteinova turbína

Původcem Reiffensteinovy turbíny je M. Reiffenstein, byla představena v roce 1925 [20]. Jedná se o přetlakovou turbínu se spirální skříň. Zásadní vlastností je absence rozváděcích lopatek, správný vstup vody do oběžného kola zajišťuje profil spirály [20]. Rozlišujeme více druhů Reiffensteinových turbín, dle osazeného oběžného kola, a sice Francis-Reiffensteinova, Kalpan-Reiffensteinova a propeler-Reiffensteinova [20].

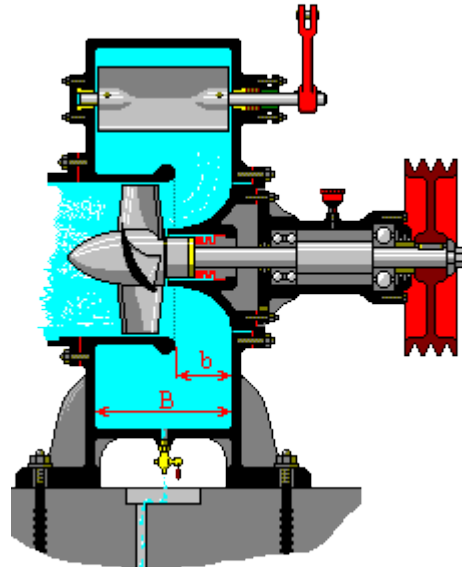
3.1.9.1 Francis-Reiffensteinova turbína

Prívod vody je řešen pomocí potrubí kruhového průřezu, těsně před turbínou je zařazen přechodový díl, který mění průřez na čtvercový [20]. Spirální skříň uvádí svým tvarem vodu do rotace a ta pak vstupuje do mezilopatkových kanálů oběžného kola, kde díky zakřivení lopatek mění voda směr a předává energii [20]. Po výstupu z oběžného kola voda odtéká savkou [20]. Na principu funkce můžeme vidět podobnost s Francisovou turbínou, jediný rozdíl je, že k přizpůsobení optimálního vstupu vody do oběžného kola je použita přímo spirální skříň a není tedy třeba rozváděcích lopatek, proto je toto provedení výrazně jednodušší a levnější [20]. Regulace je řešena regulační klapkou, která je umístěna na vstupu vody do spirální skříně [20].

3.1.9.2 Kaplan-Reiffensteinova turbína

Do Reiffensteinovy spirály lze umístit Kaplanovo kolo (regulovatelné lopatky), nebo vrtulové kolo (neregulovatelné lopatky) [20]. Na obr. 3.3 můžeme vidět horizontálně umístěnou vrtulovou turbínu. Spirální skříň je svařována z plechových výpalků, což je výhodné pro kusovou výrobu malých strojů [20]. Spirálu není nutné zužovat směrem k oběžnému kolu. Vtok do oběžného kola je asymetricky posunut vpravo, levá hrana je zaoblena navařeným prstencem z kulatiny, kvůli prevenci kontrakce [20]. Pokud by bylo

osazeno Kaplanovo kolo, řešení by bylo stejné, jen by bylo vyvedeno ovládání oběžných lopatek za řemenici [20]. Regulace vody probíhá pomocí regulační klapky ve vstupu vody do spirální skříně [20].



Obr. 3.3: Reiffensteinova spirála s propelerovým oběžným kolem (převzato z [20])

3.1.9.3 Užití

Turbíny se používají na spádech od 5 do 35 m a na malých až středních průtocích, někdy bývá osazena i na menších spádech [20]. Díky jednoduchému konstrukčnímu řešení je vhodná pro MVE [20]. Je vhodné ji použít tam, kde lze předpokládat stálý průtok, nebo je použita akumulární nádrž [20].

3.1.10 Peltonova turbína

Vynálezcem Peltonovy turbíny je Lester Allan Pelton, turbínu vynalezl v roce 1880 [2, 14]. Tvarově připomíná vodní kolo, ale oproti vodnímu kolu dosahuje větší účinnosti, až 90% [14]. Peltonova turbína (obr. 3.4) je rovnotlaká, s tangenciálním vstupem vody do oběžného kola [2].



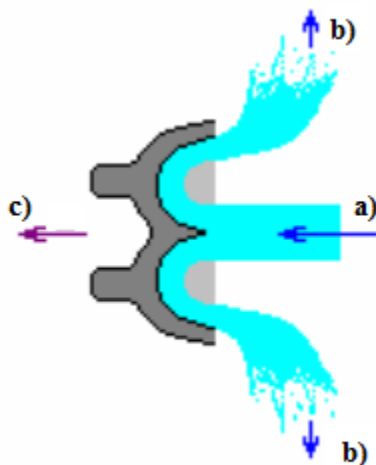
Obr. 3.4: oběžné kolo Peltonovy turbíny (převzato z [21])

3.1.10.1 Princip činnosti

Voda je přivedena skrz potrubí kruhového průřezu do jedné, či více dýz³ [2, 14]. V dýze se mění tlaková energie vody na kinetickou energii vodního paprsku, který po výstupu z dýzy vstupuje tangenciálně do oběžného kola [2, 14]. Lopatky oběžného kola jsou ve tvaru korečku s dělicím břitem uprostřed (viz obr. 3.5), dělicí břit rozděljuje vodní paprsek na dvě poloviny, po rozdělení dopadá voda na dno lopatky a předává svojí kinetickou energii, po předání energie voda volně opouští lopatky a padá do odpadu pod turbínou [2, 14]. Regulace probíhá změnou průtoku dýzou, pomocí zasouvání regulační jehly, která je poháněna servomotorem, rychlé odstavení se dělá

³ Dýza - plynule zužující se tryska

pomocí odklonu paprsku [2, 14]. Peltonova turbína se používá v horizontálním uspořádání [2].



Obr. 3.5: tvar lopatky Peltonovy turbíny, a) vstupující paprsek, b) rozdělené paprsky po předání energie, c) směr pohybu (převzato z [14])

3.1.10.2 Konstrukční řešení

Oběžné kolo je složeno z náboje a oběžných lopatek rozmístěných po obvodu, lopatky jsou ve tvaru dvojice korečků a jsou symetrické vzhledem k rovině kolmé na osu otáčení (tedy v rovině dělicího břitu) [2]. Kolo s lopatkami je buď odlito z jednoho kusu, nebo jsou lopatky k oběžnému kolu přišroubovány [14].

Dýza je kruhového průřezu, regulace probíhá změnou průtoku čehož lze dosáhnout uzavíráním a otevíráním dýzy osovým posunem regulační jehly [2]. Při posunu jehly musíme brát v potaz zvýšení tlaku v přívodním potrubí, dnes se používá systém dvojité regulace, pohyb jehly probíhá společně s pohybem deflektoru, nebo deviátoru [2]. Posuv jehly je buď mechanický, častěji však hydraulický, pomocí servomotoru (pro větší stroje) [14].

Deflektor, nebo deviátor je umístěn za výstupem z trysky, odklání rychle paprsek mimo lopatky, dýza je pak pomalu uzavírána regulační jehlou [14]. Deflektor zabírá paprsek z vnější strany, oproti tomu deviátor zabírá z vnitřní strany [2, 14]. Deviátor

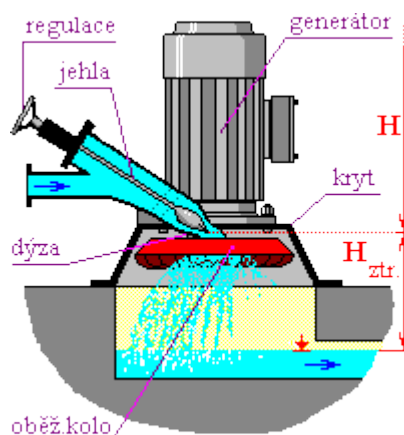
potřebuje ke své funkci pouze poloviční zdvih oproti deflektoru, lze s ním provádět pouze hrubou regulaci, naproti tomu deflektor umožňuje větší regulační rozsah [2].

3.1.10.3 Užití

Peltonova turbína je pro velké spády a malé průtoky [14]. Peltonovy turbíny se vyrábějí ve všech možných rozměrech od malých strojů pro MVE po velké turbíny s výkonem až 200 MW. Používají se pro spády od 15 m do 1800 m, dolní spády jsou pro realizaci MVE [14].

3.1.11 Turgo turbína

Rovnotlaká turbína s účinností kolem 87 %. Turgo turbína (obr. 3.6) byla vynalezena v roce 1919 ve společnosti Gilkes Energy [23]. Principiálně je velmi podobná Peltonově turbíně a liší se tvarem lopatek.



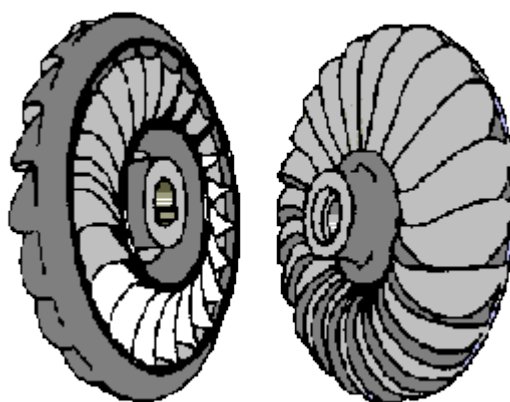
Obr. 3.6: Turgo turbína (převzato z [22])

3.1.11.1 Princip činnosti

Prívod vody je řešen potrubím kruhového průřezu, které je zakončeno jednou, nebo více dýzami. Dýza je rovněž kruhového průřezu [22]. Voda vstupuje tangenciálně do oběžného kola, které je tvořeno dvěma prstenci, a zakřivenými lopatkami [22]. Na lopatkách probíhá změna směru toku a tedy předání energie [22]. Voda opouští lopatky volně a padá do odpadu [22].

3.1.11.2 Konstrukční řešení

Ve srovnání s lopatkou Peltonovy turbíny je lopatka poloviční, tvořená pouze jednou výdutí (viz obr. 3.7) [23]. Dýza je vůči turbíně uložena šikmo, paprsek vstupuje do oběžného kola pod úhlem, obvykle 20 stupňů [23]. Plný paprsek pod tímto úhlem poskytuje maximální silový impuls a voda vystupuje volně z druhé strany lopatky, aniž by kolidovala s příchozí vodou [23]. Většinou je turbína umístěna vertikálně. Regulace probíhá zasouváním regulační jehly do dýzy, úplné odstavení pomocí šoupátka [22].



Obr. 3.7: oběžné kolo Turgo turbíny (převzato z [22])

3.1.11.3 Užití

Tuto turbínu je vhodné použít tam, kde se rozhoduje mezi Francisovou a Peltonovou turbínou [22]. Je vhodná pro velké spády při malém množství vody [22]. Oproti Peltonově turbíně je levnější, konstrukčně jednodušší, při velmi podobných vlastnostech [22]. Při využití na větších průtocích je třeba průtok rozdělit mezi více dýz, případně použít více oběžných kol [22].

3.1.12 Bánkiho turbína

Bánkiho turbínu v roce 1903 navrhl australský inženýr A. G. M. Mitchel, následně ji prof. Bánki dopracoval pro praktické použití v roce 1918 [2, 24]. Bánkiho turbína je specifickým typem rovnotlakých turbín s dvojitým průtokem oběžným kolem [2, 7, 24]. Teoreticky se oba průtoky považují za rovnotlaké, nicméně první průtok je přetlakový,

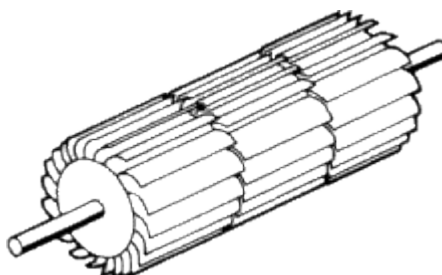
protože má voda na prvním vstupu minimální tlakovou energii, která je při prvním průtoku využita [2]. Bánkiho turbína má účinnost v rozsahu 70-85 % [7].

3.1.12.1 Princip činnosti

K oběžnému kolu je voda přiváděna kruhovým přivaděčem, před samotným vstupem do oběžného kola je zařazen mezičlánek měnící kruhový průřez na obdélný [7]. Na konci přivaděče je zpravidla umístěn regulační člen, kterým může být klapka, nebo segmentový uzávěr [2, 7]. Voda vstupuje do oběžného kola a protéká lopatkovou mříží do vnitřního prostoru kola, odkud prochází opět přes lopatkovou mříž do odpadního kanálu [2, 7]. První průtok je dostředivý, zatímco druhý je odstředivý, turbína je řazena mezi rovnotlaké, ačkoliv první průtok využívá i tlakové energie [2].

3.1.12.2 Konstrukční řešení

Oběžné kolo (obr. 3.8) je tvořeno pevnými lopatkami mezi kruhovými deskami a tvoří tak lopatkovou mříž, vnitřní prostor oběžného kola je volný pro vnitřní průtok vody [2, 25]. Turbína je zpravidla konstruována pro horizontální uložení [2, 25]. Vnitřní průtok je ponechán jako volný, nebo je usměrněn vnitřním usměrňovacím tělesem, čímž lze směřovat výtok vody do konkrétního místa v rámci zvýšení účinnosti [25]. Někdy se místo odpadního kanálu používá savka pro lepší využití spádu, savkou proudí směs vody se vzduchem [2]. Abychom dosáhli dobré účinnosti pro větší rozsah průtoků, je oběžné kolo s regulačním orgánem rozděleno, nejčastěji na třetiny [2].



Obr. 3.8: Bánkiho oběžné kolo (převzato z [26])

3.1.12.3 Užití

Díky své jednoduchosti, se často používá u MVE, hlavně z ekonomických důvodů [7]. Turbínu využíváme pro spády od 1.5 m a pro průtoky v rozsahu 0.05 až 0.9 m³/s [25].

3.1.13 Šneková turbína (Archimédův šroub)

Vynález Archimédova šroubu pochází již ze třetího století před naším letopočtem, vynálezcem je řecký fyzik Archimédes [27]. Archimédes vytvořil svůj šroub pro odčerpávání vody z lodi Syrakúsia, kterou konstruoval [28]. Tento šroub byl tvořen šikmo orientovanou dutou trubkou se spirálou na hřídeli, při otáčení hřídelí zůstávala voda v kapsách tvořených závity, kde byla držena gravitací a bylo ji tak možné přesunout na vyšší hladinu [28]. Archimédův šroub můžeme považovat za čerpadlo, obrácením funkce může fungovat jako turbína s účinností od 70 do 82 % [29].



Obr. 3.9: vodní elektrárna se šnekovou turbínou (převzato z [30])

3.1.13.1 Princip činnosti a konstrukce

K šikmo uložené šnekové turbíně (obr. 3.9) přitéká voda a vlévá se do první komůrky, tvořené šnekovým závitem, hmotnost vody působí na stěny závitu a odkrucuje jej směrem dolů, čímž voda postupuje do nižších částí závitu [27, 29]. Voda v nižších částech závitu je uzavřena v kapsách, kde nadále působí svou hmotností a nutí turbínu k otáčení [27, 29]. Na konci turbíny voda volně vystupuje do odpadního kanálu [27].

Délka šroubu se určuje podle spádu a sklonu, používají se sklony od 22 do 35 stupňů [29]. Používají se šneky dvouchodé, pro menší sklony i tříchodé [27]. Žlab, ve kterém je šnek umístěn, je většinou betonový s povrchovou úpravou nátěrem, aby byl

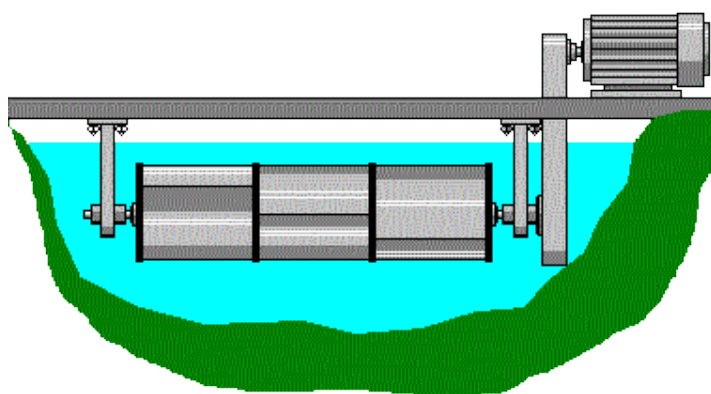
hladký [27]. Někdy se používá plechový žlab [27]. Podél žlabu se umísťuje zaoblený plechový kryt, aby voda nevystříkala ze žlabu ven [27]. Další možností je umístit šnek do velké trubky, která slouží jako žlab i jako kryt [27]. Šneková turbína je obtížně regulovatelná, funkci regulace plní asynchronní generátor [27].

3.1.13.2 Užití

Šneková turbína se používá v MVE ve spojení s asynchronním generátorem [27]. Často se používá jako náhrada starých vodních kol na nečisté vodě, nevyžaduje jemné česle [27]. Šneková turbína je velmi odolná a pracuje i při proměnném průtoku [27]. Používají se do spádů 8 metrů a výkonů cca 150 kW, větší stroj má problém s průhybem hřídele a ve srovnání s vrtulovými by byl nesrovnatelně velký [27].

3.1.14 Savoniova turbína

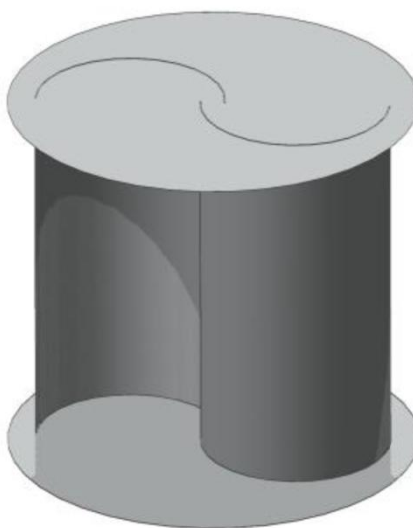
Savoniův rotor byl původně určen pro větrné elektrárny, nicméně principiálně může pracovat i s jiným druhem média, například vodou [31]. Turbína je horizontálně orientovaná (viz obr. 3.10) a využívá rychlost tekoucí vody v řečišti s účinností 23 % [32]. Principem je využít rozdílného odporu proudícího média na vydatou a vypouklou plochu rotoru [31–33]. Rotor (obr. 3.11) je tvořen dvojicí či trojicí lopatek polokruhovitěho tvaru [33].



Obr. 3.10: Savoniova turbína (převzato z [32])

Vnitřní okraje lopatek procházejí až za střed rotoru, a tak může médium protékat mezi jejich zadními stranami [32]. Voda vstoupí do zakřivené lopatky a dostává se až ke středu oběžného kola, oběžné kolo se mezitím pootočí a tak voda vytéká opět ven, místo

aby protékala středem kola [33]. Turbína bývá tvořena více rotory, které jsou vzájemně pootočené kvůli plynulému záběru [32]. Hlavní výhodou je jednoduchost a zásadní nevýhodou malá účinnost [32, 33]. Používá se hlavně jako turbína na přenosných zařízeních, které položíme přes přirozený tok, případně může být součástí pontonové elektrárny [32]. Ke své činnosti potřebuje vodní tok s rychlostí alespoň 1 m/s [32].



Obr. 3.11: Tvar Savoniiova oběžného kola (převzato z [34])

3.2 Vodní kola

Vodní kola jsou vývojově starší typ vodních motorů, historicky je využívali již staří Římané [7]. Vrcholu využití v energetice dosáhla vodní kola v počátku minulého století, poté byla postupně nahrazena turbínami [2]. V dnešní době jsou vodní kola zajímavá hlavně z hlediska využití hydroenergetického potenciálu na malých spádech od 0,3 do 1,5 m [2]. Použití vodních kol místo turbíny je na těchto spádech výhodné protože [2]:

- vodní kolo je konstrukčně jednoduché a velmi levné
- vodní kola nevyžadují stavbu vzdouvacích zařízení
- provozu vodních kol nebrání listy, ledová tříšť, atd.

3.2.1 Rozdělení vodních kol

Vodní kola můžeme rozdělit podle místa nátoku vody na kolo, podle způsobu využití energie, podle směru otáčení kola vzhledem k proudu dolní vody [2].

Rozdělení podle místa nátoku vody na kolo:

- se svrchním nátokem
- se středním nátokem
- se spodním nátokem

Rozdělení podle způsobu využívání vodní energie:

- lopatková - převážně využívají kinetickou energii vody
- korečková - převážně využívají potenciální energii vody

Rozdělení podle směru otáčení kola vzhledem k proudění spodní vody:

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

3.2.2 Lopatková kola

Lopatková vodní kola jsou konstruována s radiálně umístěnými rovnými lopatkami, přitékající voda do nich vtéká kolmo [2]. Provedení lopatkových kol bylo buď se spodním nátokem, případně středním. Lopatková kola byla využívána pro spády od 0,1 do 2,5 m, při průtocích 1,5 - 5 m³, s účinností v rozmezí 20 - 65 % [2].

3.2.2.1 Hřebenač

Nejjednodušší typ vodního kola, řešení pochází ze starověku, účinnost je maximálně 35 % [35].

Před vodním kolem je zařazeno stavidlo, pod přizvednutým stavidlem se vodní spád mění na kinetickou energii [35]. Voda při vstupu do kola narazí do lopatky a částečně vyběhne do výše, opíráním vody o lopatku je kolo uváděno do pohybu [35]. Při vstupu dochází k náhlé změně, což má za následek rázy a víření a tedy značné ztráty [35]. Po odevzdání energie voda opouští lopatky, je vhodné udělat v místě opouštění prohlubeň, aby voda mohla klidně odtékat [35].

Hřebenač (obr. 3.12) se hodí pro jednoduché aplikace, kde počítáme s velkými ztrátami [35]. Je vhodný pro volně postavené přenosné agregáty, nebo plující pontony [35].



Obr. 3.12: Hřebenač (převzato z [36])

3.2.2.2 Ponceletovo kolo

Řešení Ponceletova kola (obr. 3.13) pochází z roku 1826, vynalezl jej francouzský inženýr Jean Victor Poncelet, kolo pracuje s účinností až 65 % [37].

Voda vstupuje do skloněné zakřivené lopatky, po které vyběhne nahoru [37]. Při této změně pohybu se voda opírá o lopatku a tím uvádí kolo do pohybu [37]. Přeměna probíhá s malými ztrátami, jedná se o plynulou změnu bez rázů a víření [37]. Stoupáním po lopatce voda odevzdává svoji kinetickou energii, po odevzdání energie se voda zastaví a poté se začne pohybovat směrem dolů [37]. Směrem dolů se voda opět pohybuje po zakřivené ploše lopatky a znovu tak uvádí kolo do pohybu [37]. Lopatku voda opouští kolmo dolů, proto je třeba, aby v místě výtoku byla prohlubeň a voda klidně mohla odtékat odpadním kanálem [37].

Je vhodné jej použít tam, kde malý spád vylučuje turbínu [37]. Je vhodné pro malé přenosné agregáty, které se volně postaví do toku, nebo pro plující pontonové elektrárny [37].



Obr. 3.13: Ponceletovo vodní kolo (převzato z [38])

3.2.3 Korečková kola

Korečková kola jsou stavěna pro střední a horní nátok, využívají potenciální energii [2]. Do korečků vtéká voda s kinetickou energií, při jejím využití lze dosáhnout vyšší hydraulické účinnosti, a tak se využívá hlavně plynule zakřivených korečků, které snižují ztráty způsobené nárazem vody při vstupu do lopatky [2]. Pro přívod vody a nasměrování paprsku se používá kulisa [2]. Je vhodné, aby korečky byly plněny maximálně do poloviny své hloubky a kolo dosahovalo obvodové rychlosti maximálně 2 m/s, při vyšších rychlostech by vlivem odstředivé síly voda předčasně vytékala [2]. Není žádoucí, aby se korečkové kolo brodilo ve spodní vodě, protože to vede ke snížení účinnosti [2]. Korečková kola se stavěla pro spády od 3 do 10 m, při průtocích v rozsahu 0,3 - 1,5 m, při účinnosti až 80 % [2].

3.2.3.1 Korečník na horní vodě

Není znám původce řešení, návrhy podobného kola popisoval Plinius v Římě v druhém století před naším letopočtem [39]. Korečník dosahuje účinnosti až 80 % [39].

Přívod vody ke kolu je realizován korytem, kterému se nazývá vantrok [39]. Na konci koryta je regulační člen, nejčastěji šikmé stavidlo [39]. Voda pod stavidlem vytváří plochý vodní paprsek, který vstupuje do kola v jeho nejvyšším bodě [39]. Kolo je tvořeno dvěma postraními věnci, šikmými lopatkami a vnitřním bedněním kola, věnce s lopatkami tvoří skloněné korečky [39]. Voda vstupuje do korečku a nárazem uvádí kolo do pohybu [39]. Po vstupu do korečku voda působí svou hmotností [39]. Ve spodní části voda volně vytéká z korečků ven [39].

Horní korečník (obr. 3.14) je vhodný pro využití v MVE [39]. Jedná se o motor nenáročný na obsluhu s jednoduchou konstrukcí a údržbou [39]. Používá se pro spády od 2.5 do 10 m, a pro průtoky od 12 až do 500 l/s [39].



Obr. 3.14: Horní korečník (převzato z [40])

4 Zajímavé vodní elektrárny

V této kapitole budou uvedeny světové vodní elektrárny, které mají prvenství v některé z kategorií (např.: největší instalovaný výkon, nejvyšší hráz, atd.), tyto elektrárny budou následně srovnány s jejich českým ekvivalentem.

4.1 Tři soutěsky

Vodní elektrárna Tři soutěsky (obr. 4.1) leží na řece Jang-c'-ťiang, v Číně. Nápad na vybudování obří přehrady pochází z roku 1919, konflikty a změny režimu neumožnily stavbu [41]. Stavba byla povolena až v roce 1992 a započala v roce 1994, dokončení proběhlo v roce 2003 [41]. V rámci stavby přehrady bylo třeba přestěhovat 1.3 milionu obyvatel [41].

O výrobu elektrické energie se stará 34 generátorů, které pohání Francisovy turbíny, z toho 32 dodává elektřinu do sítě, každý o výkonu 700 MW [41]. Zbylé 2 generátory, každý o výkonu 50 MW, dodávají energii pro vlastní spotřebu elektrárny [41]. Se svým instalovaným výkonem 22 500 MW získává tato elektrárna světové prvenství [41]. Spád je 113 m [41]. Pro akumulaci energie slouží masivní hráz o výšce 185 m a délce přes 2300 m [41]. Hráz může zadržet až 39.3 miliard m^3 vody [41]. Délka vodní plochy je 600 km [41]. Roční výroba elektrické energie se pohybuje okolo 98 TWh [41]. V roce 2014 vyrobila elektrárna 98,8 TWh [41]. Podle vědců NASA může obří masa vody v přehradě působit na rotaci země, čímž může dojít ke zkrácení dne o 0.06 μs [42].



Obr. 4.1: Tři soutěsky (převzato z [41])

4.2 Itaipu

Elektrárna Itaipu (obr. 4.2) se nachází na řece Paraná na hraničním rozhraní států Brazílie a Paraguay. V roce 1973 proběhla příprava smlouvy o stavbě vodního díla, samotné stavební práce začaly v roce 1975 a skončily v roce 1982 [43].

Výroba elektrické energie probíhá pomocí 20 soustrojí s Francisovou turbínou o výkonu 700 MW, celkový instalovaný výkon je pak 14 000 MW [43]. Ačkoliv má elektrárna téměř poloviční instalovaný výkon ve srovnání s Třemi soutěskami, dosahuje ročně srovnatelného množství vyrobené energie, v roce 2016 vyrobila dokonce 103 TWh, čímž získala světový rekord [44]. Spád elektrárny je 125,9 m [45]. Voda je akumulována hrázi o délce 7 700 m a výšce 196 m, délka vodní plochy je 170 km [43]. Přehrada je častým turistickým cílem a tak bylo vybudováno dynamické noční osvětlení přehrady, vzhledem k rozměrům hráze se jedná o velký projekt. Vnější zdi jsou osvětleny bíle, potrubí žlutě a spádové části červeně [43]. Celkový instalovaný příkon osvětlení je 1 000 kW [43].

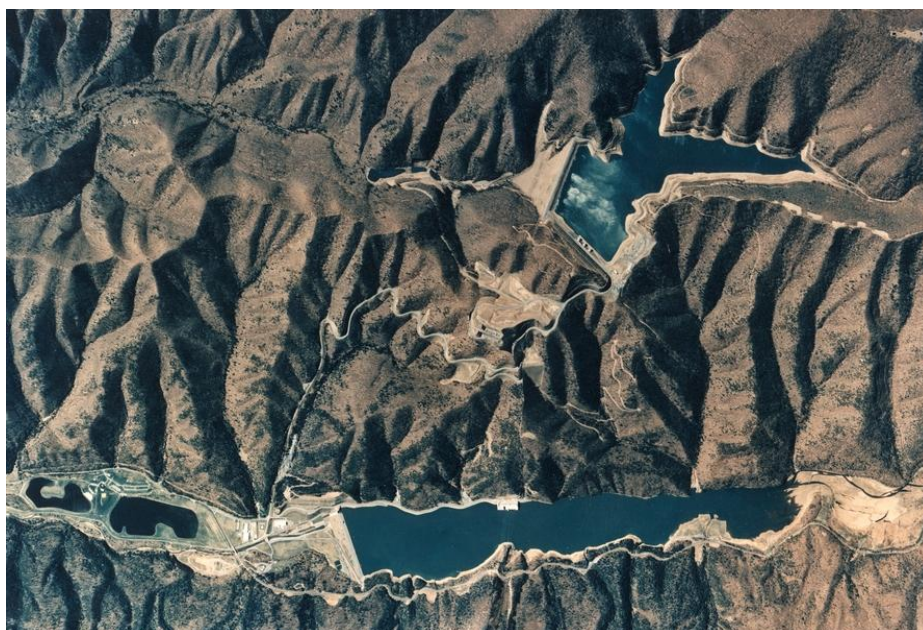


Obr. 4.2: Itaipu (převzato z [44])

4.3 Bath County Pumped Storage Station

Je přečerpávací elektrárna, které se někdy přezdívá "největší baterie na světě". Elektrárna se nachází ve Virginii v USA. Stavba elektrárny započala v roce 1977 a byla dokončena v roce 1985 [46].

Spodní nádrž je vybudována přehrazením řeky Black Creek, horní nádrž je uměle vybudována na kopci, má malý přirozený přítok (obr. 4.3). Objem horní nádrže činí 14 000 000 m³ [47]. K výrobě elektřiny a zároveň čerpání vody slouží šestice Francisových turbín s výkonem 500.5 MW pro výrobu elektrické energie na spádu 385 m a výkonem 480 MW pro čerpání [46]. Celkový instalovaný výkon je 3003 MW a jak vyplývá z přezdívky elektrárny, řadí se na první místo mezi přečerpávacími elektrárnami [46]. Energie z této elektrárny slouží k vykrývání spotřebních špiček, celkem zásobuje energií 60 milionů lidí ve třinácti státech USA [47].



Obr. 4.3: Pohled na nádrže elektrárny Bath County (převzato z [48])

4.4 Jinping- I

Je elektrárna nacházející se na čínské řece Yalong v provincii Sichuan. Stavba započala v roce 2005 a byla dokončena v roce 2013, všechny soustrojí byly uvedeny do provozu o rok později [49].

K výrobě elektrické energie slouží šestice Francisových turbín, každá s výkonem 600 MW. Celkový instalovaný výkon je 3600 MW [49]. Nejzajímavějším prvkem elektrárny je její hráz, s výškou 305 m se jedná o nejvyšší hráz na světě [49]. Spád je 240 m [50]. Stavba přehrady byla velmi náročným projektem a bylo třeba překonat spoustu technických problémů na světové úrovni [51]. Jedná se tak o nejvyšší přehradu s největším náklonem, nejproblematictějším řešením dopravy, nejproblematictějšími geologickými podmínkami aj. [51]. Celkem si stavba vysloužila 10 světových rekordů [51]. Přehrada je postavena z 26 betonových sekcí [49]. Brzy bude prvenství této hráze překonáno čínskou Shuangjiangkou, která je nyní ve výstavbě a bude mít hráz o výši 314 m [49]. Roční výroba el. energie je v rozmezí 16 až 18 TWh [51]. Jinping I (obr. 4.4) je součástí komplexu Jinping, který dále zahrnuje Jinpin II, elektrárnu s přehradně derivačním schématem, umístěnou pod povrchem, začátek derivace je v přehradě Jingpin I [50].



Obr. 4.4: Jinping I (převzato z [51])

4.5 Dlouhé stráně

Pokud chceme hledat "nej" v české energetice, nenajdeme jich více jinde, než na Dlouhých stráních. Dlouhé stráně jsou přečerpávací elektrárna, jejíž stavba započala v roce 1978 a byla dokončena a uvedena do provozu v roce 1996 [7].

Srdcem elektrárny je dvojice reverzních Francisových turbín s výkonem 325 MW v režimu turbíny a 312 MW v režimu čerpadla [52]. Jedná se o největší Francisovu turbínu v Evropě [52]. Celkový instalovaný výkon elektrárny je 650 MW a jedná se tak o elektrárnu s největším instalovaným výkonem v ČR. Dlouhé stráně (obr. 4.5) pracují se spádem 510.7 m, čímž získávají prvenství za elektrárnu s největším spádem v rámci ČR [52]. Elektrárna samotná je umístěna v podzemí. Horní nádrž je umístěna na hoře Dlouhé stráně, dolní nádrž je na toku řeky Divoká Desná [52]. Objem horní nádrže je 2 720 000 m³ [52]. Dlouhé stráně jsou pro českou energetiku významné, plní v rámci elektrifikační soustavy funkci statickou, dynamickou a kompenzační. Statická funkce znamená využití elektrárny pro pokrytí výkonových špiček a naopak akumulace energie (čerpáním do horní nádrže) v době přebytku [52]. Dynamickou funkcí je výroba regulačního výkonu, podílení se na řízení frekvence soustavy a plnění výkonové rezervy [52]. Poslední, kompenzační funkcí je regulace napětí v rámci soustavy [52]. V roce 2016 vyrobila elektrárna 716 GWh energie [53].



Obr. 4.5: Horní a dolní nádrž Dlouhé stráně (převzato z [52])

4.6 Dalešice

Vodní elektrárna Dalešice (obr. 4.6) je přečerpávací elektrárna, jejíž stavba započala v roce 1970 a byla dokončena v roce 1978 [54].

Pro svůj provoz elektrárna využívá čtveřici Francisových reverzních turbín, každá o výkonu 120 MW, celkový instalovaný výkon je 480 MW a jedná se tak o druhý největší výkon v ČR [54]. Spád je 90 m [54]. Jako horní nádrž slouží přehrada Dalešice na řece Jihlavě s celkovým objemem 127 000 000 m³ [54]. Vzdouvacím zařízením vodní nádrže je 100 m vysoká sypaná hráz, která je nejvyšší hrází v ČR [54]. Vodní nádrž slouží hlavně k zajištění technologické vody pro nedalekou JE Dukovany, dále pak jako horní nádrž přečerpávací elektrárny [54]. Kromě energetických účelů slouží nádrž také k chovu ryb. U paty mohutné hráze je umístěna elektrárna Dalešice. Jako spodní nádrž slouží elektrárně vodní nádrž Mohelno, která začíná hned za přehradou Dalešice a leží také na řece Jihlavě. Elektrárna je schopna najet do plného výkonu během 60 s, hraje významnou úlohu při regulaci výkonu v české energetické soustavě. Elektrárna je zároveň navržena tak, aby v případě výpadku Dukovan plně nahradila jeden blok [7].



Obr. 4.6: Dalešice (převzato z [54])

4.7 Orlík

Vodní elektrárna Orlík (obr. 4.7) je situována u vodní nádrže Orlík na řece Vltavě. Stavba započala v roce 1954 a do provozu byla uvedena již v roce 1961 [55]. Elektrárna je součástí vltavské kaskády a je největší akumulární elektrárnou v ČR co do výkonu.



Obr. 4.7: Orlík (převzato z [55])

Svoji energii voda odevzdává čtyřem instalovaným Kaplanovo turbínám o výkonu 91 MW [55]. Přívod vody k turbínám je proveden spirálovým přivaděčem, lopatky jsou ovládány hydraulickými motory. Spád je 70,5 m a celkový instalovaný výkon 364 MW [55]. Každá turbína má celkem 8 lopatek, ačkoliv v původním návrhu jich bylo 10 [55]. Kaplanovy turbíny z Orlíku byly oceněny zlatou medailí na světové výstavě EXPO 58 (původní desetilopátková verze). Spád 70,5 m je pro Kaplanovu turbínu netypicky velký, užití Kaplanových turbín na takovém spádu je světovou raritou. Turbíny roztáčejí čtveřici generátorů, které pracují s napětím 15 kV [55]. Toto napětí je dále zvyšovacími transformátory posíláno do sítě. Transformátorů je celkem 6, jsou jednofázové a jsou umístěny vně budovy elektrárny [55]. Elektrárna je významným prvkem výroby elektřiny v ČR. Regulace elektrárny je dálková z centrálního dispečinku, pro plné najetí potřebuje 128 sekund [55]. Roční objem vyrobené elektrické energie je průměrně 398,1 GWh [56].

Přehrada vodní nádrže byla budována revolučním způsobem. Sestává z několika obřích bloků betonu, do té doby bylo při velké betonáži potřeba chlazení. Při stavbě bloků hráze Orlíku byl do betonové směsi přidáván popílek, který zpomaloval tuhnutí a uvolňování tepla a tak nebylo chlazení potřeba. To vedlo k rychlejšímu a jednoduššímu postupu. Hráz je protkána chodbami, na spoustě míst jsou vyvedeny měřící otvory, například v dilatačních spárách. Celková výše hráze je 91,5 m a jedná se o nejvyšší betonovou hrázi v ČR a druhou nejvyšší hrázi v ČR (první je sypaná hráze Dalešice) [55]. Vzduší Vltavy sahá do vzdálenosti 70 km [55]. S nádrží je spojena i temnější část naší historie, a sice gang tzv. Orlických vrahů.

4.8 Porovnání základních parametrů

4.8.1 Přečerpávací

Největší přečerpávací elektrárnou na světě je americká Bath Country Pumped Storage Station. Dosahuje celkového instalovaného výkonu 3003 MW, což je více než čtyř a půl násobek instalovaného výkonu české největší přečerpávací elektrárny Dlouhé stráně. Přesto jsou Dlouhé stráně úctyhodnou stavbou, jedná se o nejvýkonnější elektrárnu v ČR, s největším spádem v ČR a nejvýkonnější Francisovou turbínou v celé Evropě. Z tab. 4.1 můžeme vidět zajímavý nepoměr mezi objemem horní nádrže u Dalešic a ostatních. Zatímco horní nádrž Bath Country a Dlouhých stránek slouží pouze pro účely přečerpávací elektrárny, nádrž Dalešic je na toku velké řeky a mimo jiné plní protipovodňovou a regulační funkci. V tab. 4.1 můžeme vidět porovnání základních parametrů představených přečerpávacích elektráren.

Tab. 4.1: základní parametry přečerpávacích elektráren

Elektrárna	Bath Country	Dlouhé stráně	Dalešice
Počet a typ turbíny	6x Reverzní Francisova	2x Reverzní Francisova	4x Reverzní Francisova
Výkon turbíny [MW]	505	325	120
Celkový výkon [MW]	3003	650	480
Spád [m]	385	510,7	90
Objem horní nádrže [mil. m ³]	14	2.72	127
Uvedení do provozu	1985	1996	1978

4.8.2 Akumulační

Dle instalovaného výkonu je největší světovou elektrárnou čínský kolos Tři soutěsky. Dle instalovaného výkonu světová druhá elektrárna Itaipu však Tři soutěsky předčí v ročním objemu výroby elektrické energie. V současnosti je držitelem prvního místa s objemem 103 TWh. Důvodem je rozdíl ve vodnatosti a průtoku řek, na kterých tyto elektrárny leží. Česká největší akumulční elektrárna Orlík má oproti těmto dvěma kolosům zlomkové parametry. Bohužel v ČR se nenachází tak obří vodní toky, na kterých leží Tři soutěsky a Itaipu. Přesto je Orlík velmi významným pro ČR, jedná se o nejvýkonnější českou akumulční elektrárnu, třetí nejvýkonnější celkově (před ním jsou Dlouhé stráně a Dalešice), vzdouvací zařízení Orlíku je druhá nejvyšší hráz v ČR (nejvyšší je na přehradě Dalešice). Další zajímavou světovou akumulční elektrárnou je čínský Jinping 1, stavba překonala celkem 10 světových rekordů. Pro akumulaci byla postavena nejvyšší hráz na světě s výškou 305 m. V tabulce 4.2 můžeme vidět porovnání základních parametrů přestavených akumulčních elektráren.

Tab 4.2: základní parametry akumulčních elektráren

Elektrárna	Tři soutěsky	Itaipu	Jinping - I	Orlík
Počet a typ turbíny	34x Francisova	20x Francisova	6x Francisova	4x Kaplanova
Výkon turbíny [MW]	32x700 + 2x50	700	600	91
Celkový výkon [MW]	22 500	14 000	3 600	364
Spád [m]	113	125.9	240	70.5
Výška hráze [m]	185	196	305	91.5
Roční výroba [TWh]	přibližně 98	90-100, max 103	14 - 18	0,398
Uvedení do provozu	2003	1982	2013	1961

4.8.3 Světová a česká prvenství

V následující tabulce 4.3 můžeme vidět porovnání světových a českých prvenství v oblasti vodních elektráren.

Tab. 4.3: Prvenství vodních elektráren

Prvenství	Světové	České
Největší instalovaný výkon	Tři soutěsky 22 500 MW	Dlouhé stráně 480 MW
Největší výroba ročně	Itaipu 103 TWh	Dlouhé stráně 716 GWh
Nejvyšší hráz	Jinping - I 305 m	Dalešice 100 m
Největší přečerpávací	Bath Country 3003 MW	Dlouhé stráně 480 MW
Největší akumulční	Tři soutěsky 22 500 MW	Orlík 364 MW

5 Příprava modelů pro 3D tisk a realizace

V následující kapitole bude představen základní princip práce v programu AutoCAD 2019 a přehled jednotlivých modelů vodních motorů pro 3D tisk. Pro přehlednost budou uvedeny pouze obrázky modelů z programu AutoCAD a výkresy budou k nalezení v přílohách.

5.1 3D tisk

3D tisk je aditivní technologií vytváření modelů na základě počítačové předlohy. Pro vytvoření předlohy se používají systémy počítačem podporovaného kreslení – CAD. Mezi takové programy patří například AutoCAD, Solid Edge, SolidWorks, Inventor. Samotný tisk probíhá postupným vrstvením materiálu ve směru kladné části osy Z. Nanášení materiálu probíhá pomocí pohyblivých trysek, materiál je dodáván například ve formě strun. Pokud jsou nějaké části modelu ve vzduchu, je třeba tisknout model společně s podpěrami, které je z výsledného modelu nutné opracováním odstranit. Dnes již existují i materiály rozpustné ve vodě, podpěry z těchto materiálů není třeba mechanicky odstraňovat, stačí vytisknutý model umístit do vody. Základní tiskárny používají jako tiskový materiál různé druhy plastů, například PLA, ABS, PET. Existují ale i tiskárny, které mohou pracovat s kovovými materiály. 3D tisk se uplatní ve spoustě odvětví, v současnosti zažívá velký rozvoj s dostupností základních tiskáren pro domácí použití. 3D tisk lze využít v rámci malovýroby, pro vývoj prototypů, nebo třeba ve zdravotnictví, kde jej využijí lékaři pro cvičné zákroky. S dnešní technologií není problém vytisknout přesný model pacientova srdce a připravit si na něm postup zákroku, nebo vytisknout náhrady pro transplantace, v ČR je známý případ, kdy byla pacientovy voperována lopatka, která byla vytvořena přesně pro něj [57].

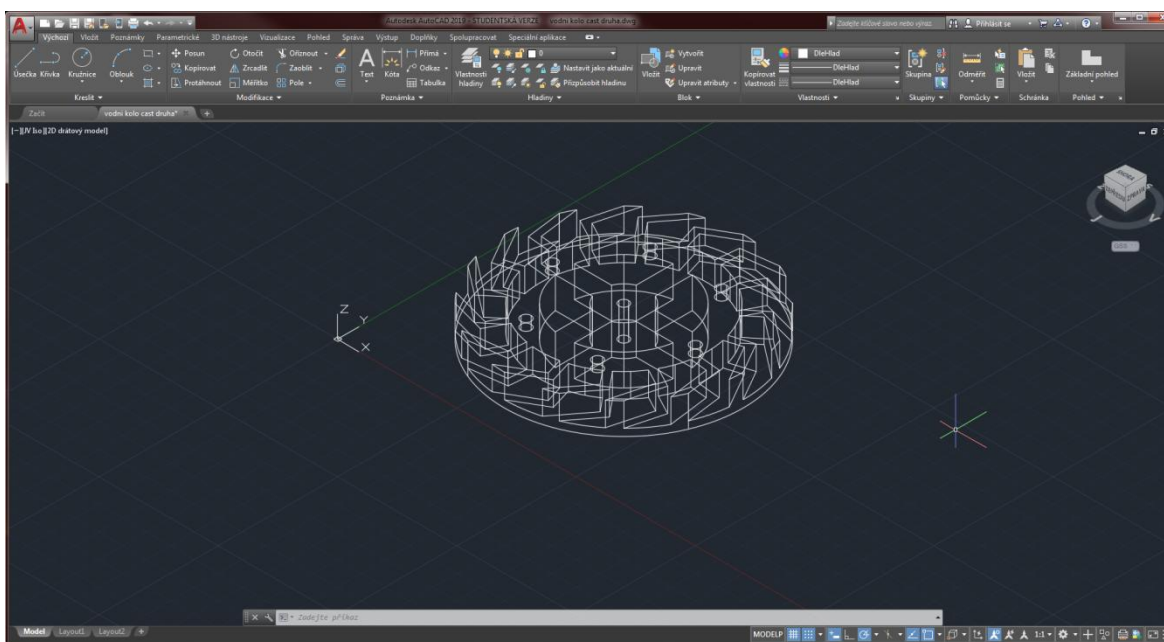
5.2 AutoCAD

AutoCAD je program pro 2D i 3D modelování od společnosti Autodesk. Jedná se o jeden z nejznámějších programů svého druhu. Pro modelování v rámci této práce byla použita studentská verze programu AutoCAD 2019, získaná v rámci programu AutoCAD

Educational. Před samotným popisem modelů se podíváme na prostředí AutoCADu a základní příkazy.

5.2.1 AutoCAD uživatelské rozhraní

Uživatelské prostředí lze spatřit na obrázku 5.1. V horní části můžeme vidět záložky s jednotlivými skupinami funkcí. Největší, střední část je věnována modelovému prostoru. Pro snazší práci je modelový prostor rozdělen souvislou mřížkou, jejíž nastavení lze upravovat. V pravém horním rohu modelového prostoru se nachází navigační kostka, která nám umožňuje rychle měnit pohledy. Modelový prostor je určen souřadnicovým systémem XYZ. 2D modely se kreslí v rovině XY, jejich protažení do 3D obvykle ve směru Z. Souřadný systém jde dle potřeby natáčet. V dolní části okna jsou nástroje vztahující se ke způsobu zadávání, například úchyty kurzoru k mřížce modelového prostoru, nebo úchyty k částem objektů (střed objektu, koncový bod, ...apod.), nebo omezení pohybu kurzoru na dané směry.

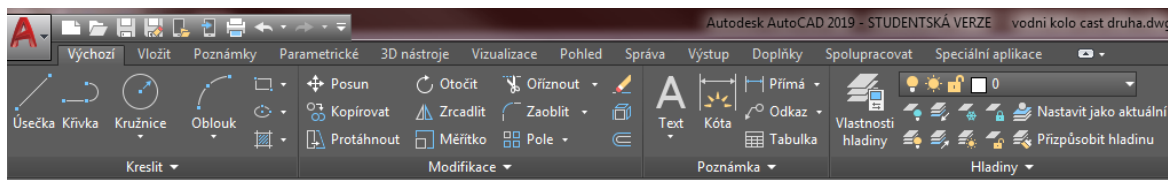


Obr. 5.1: Uživatelské prostředí AutoCADu

5.2.2 Lišty záložek

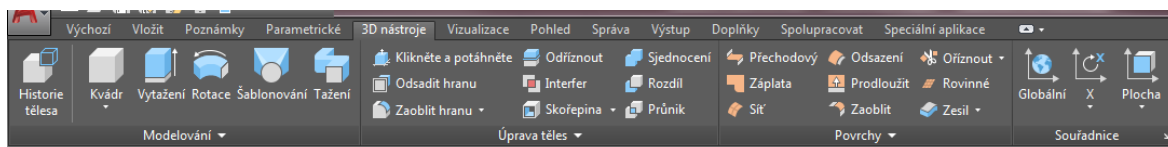
Představme si dvě nejdůležitější záložky s příkazy a sice „výchozí“ na obr. 5.2 a „3D nástroje“ na obr. 5.3.

Defaultní záložka „Výchozí“ obsahuje nástroje základní geometrie. Nalezneme zde příkazy pro tvorbu úsečky, obdélníku, oblouku, kružnice, šroubovice ... apod. Dále jsou zde mimo jiné základní funkce pro editaci 2D objektů, jako zrcadlení, otočení, protažení k další hraně, oříznutí, kopírování a velmi důležitý příkaz pole. Dále jsou zde nástroje pro kótování a pro práci s jednotlivými vrstvami (slouží pro přiřazení vlastností různým druhům čar, například konstrukční, kótovací).



Obr. 5.2: Základní příkazy lišty Výchozí

Záložka 3D nástroje obsahuje soubor příkazů pro práci s 3D objekty a povrchy. Obecně lze k modelování 3D objektů přistupovat dvěma způsoby: jako objemová součást (solid), nebo přes povrchy (surface). Práce s objemovou součástí zahrnuje klasické úkony obrábění. Pokud pracujeme s povrchy (plochy s nulovou tloušťkou), musíme nejdříve vytvářet součást ohýbáním těchto ploch a následně je příkazem „zesil“ převést na tlustostěnnou plochu. Pokud povrchy uzavírají nějakou oblast neprodyšně, lze je převést na objemovou součást. Pro účely této práce bude používáno výhradně objemové modelování. Mezi základní 3D nástroje patří tvorba základních 3D těles (kvádr, jehlan...), vytažení, vytažení rotací, tažení po křivce. Jednotlivá tažení vytváří 3D objekt vytažením 2D uzavřené plochy o rozměr, úhel, apod. Dále jsou zde příkazy pro editaci 3D objektů, jedná se o množinové operace (rozdíl, sjednocení ...) a příkazy jako skořepina, zaoblení a zkosení hran, vytažení stran. Další skupinou jsou příkazy pro editaci povrchů. Poslední důležitou skupinou v 3D nástrojích je editace souřadného systému. Umožňuje posun souřadného systému, jeho natočení, zarovnání s pohledem, či s plochou objektu.

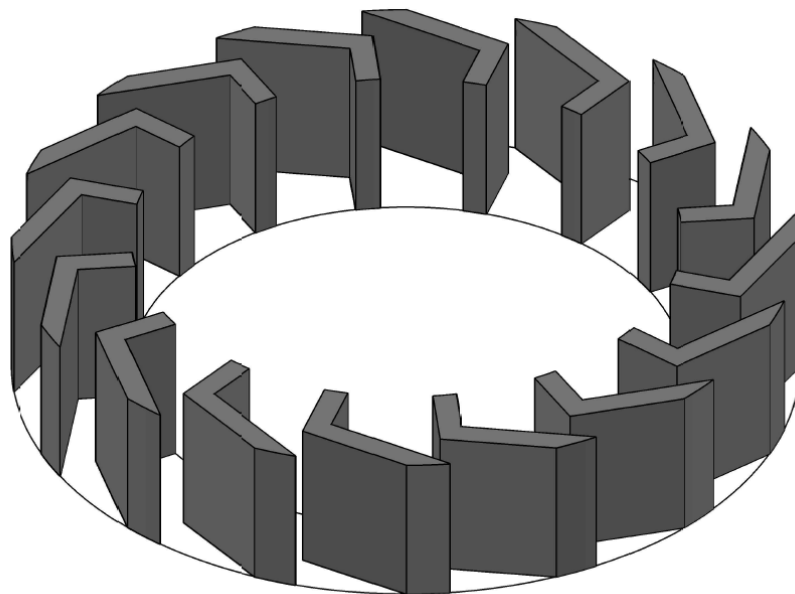


Obr. 5.3: Základní příkazy lišty 3D nástroje

5.3 Model vodního kola

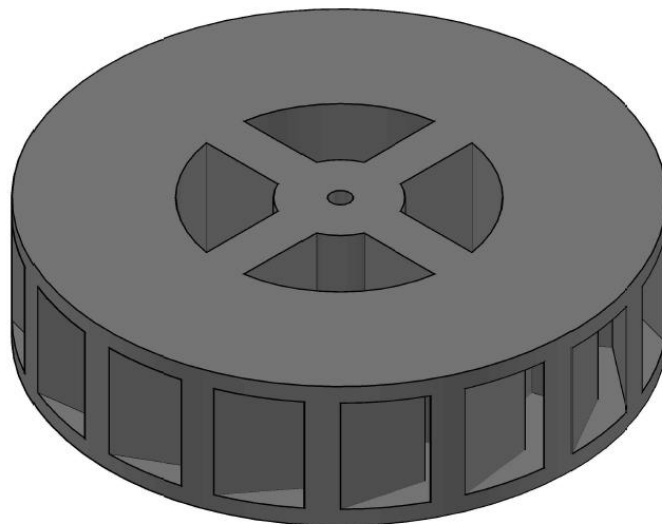
Jako zástupce vodních kol byl pro model vybrán horní korečník pro jeho přednosti jako vysoká účinnost a jednoduchá aplikace v MVE.

Nejdříve byl vymodelován tvar lopatky. Následně se pomocí vytažení vytvořila lopatka jako objemový díl. Dále pomocí příkazu polární pole byla vytvořena kruhová soustava 16 lopatek. Pole lopatek společně s vnější a vnitřní kružnicí lze vidět na obrázku 5.4. Vytažením vnějšího kruhu směrem dolů byl vytvořen vnější věnec kola. Tento věnec byl pak zkopírován a umístěn také na horní část, tím byly lopatky uzavřeny. Následně byl vytažen vnitřní kruh, který slouží jako dno lopatek. Do tohoto vnitřního válce byly pak vyříznuty odlehčovací otvory a otvor pro hřídel, které prochází i skrz věnec.



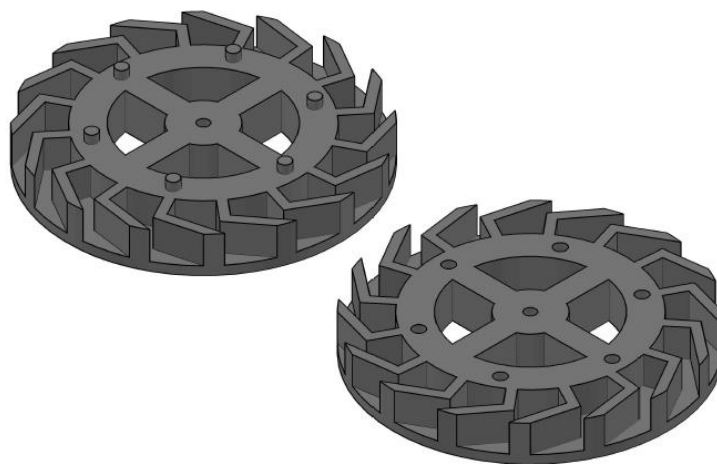
Obr. 5.4: Pole lopatek

Výsledkem je model vodního kola, jak jej lze vidět na obrázku 5.5. Takto vytvořený model ale není vhodný pro 3D tisk, protože horní kruh je ve vzduchu nad mezilopatkovým prostorem. Z tohoto důvodu bylo třeba model upravit pro 3D tisk.



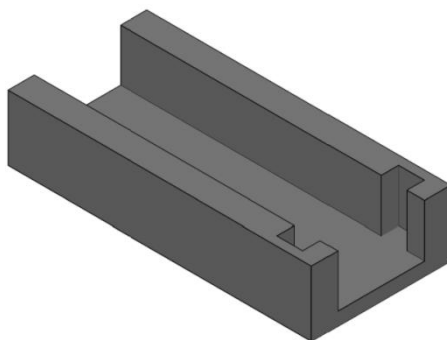
Obr. 5.5: Model vodního kola

Model bylo třeba upravit tak, aby všechny části pokud možno při tisku narůstaly směrem vzhůru a žádná nevisela ve vzduchu. Kolo tedy bylo rozříznuto na dvě poloviny v rovině středu lopatky. Rozříznutý model vodního kola můžeme vidět na obrázku 5.6. Pro jednodušší spojení byla do kola doplněna soustava centrovacích bodů (otvor - čep).



Obr. 5.6: Dvě poloviny vodního kola

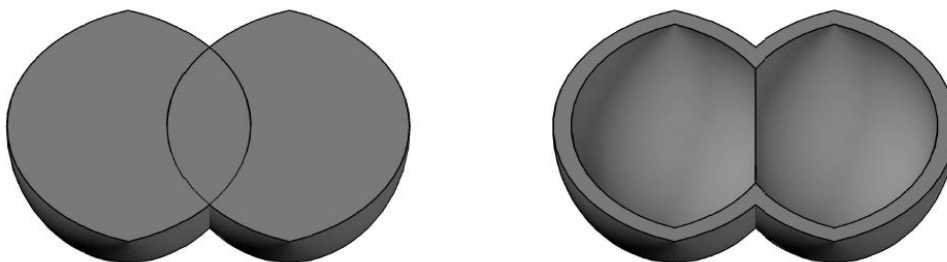
Kromě kola byl vymodelován ještě přivaděč vody (Obr. 5.7). Přivaděč na jednom konci obsahuje zářezy do stěn pro umístění regulačního stavidla. Nejdříve byly vymodelovány obrysy stěn při pohledu shora. Stěny pak dostaly svůj objem vytažením a byly spojeny obdélníkem, rovněž vytaženým.



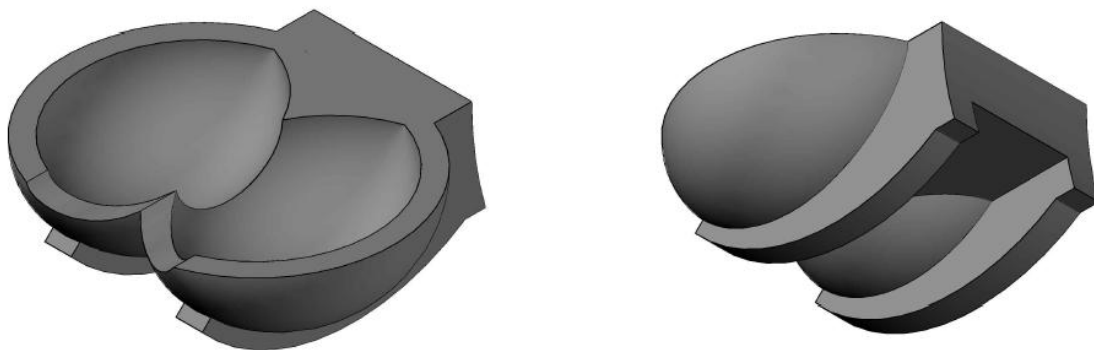
Obr. 5.7: Přivaděč pro vodní kolo

5.4 Model Peltonovy turbíny

První modelovanou turbínou je Peltonova turbína. Vybrána byla kvůli širokému využití. Prvním krokem bylo vymodelovat lopatku. Lopatka je vytvořena obloukem, ze kterého vytažením rotací o 180° vznikla jedna polovina lopatky. Vytvořený objekt byl pak zkopírován vedle tak, aby se částečně překrývaly, jako na obrázku 5.8. Obě poloviny lopatky byly sloučeny a nástrojem skořepina byla odstraněna vnitřní plocha a vytvořena stěna lopatky. Tento postup lze vidět na obr. 5.8. Následně byly z jedné části vymodelovány výřezy pro průchod vodního paprsku a z druhé části připojení pro uchycení na náboj (detail viz obr 5.9).

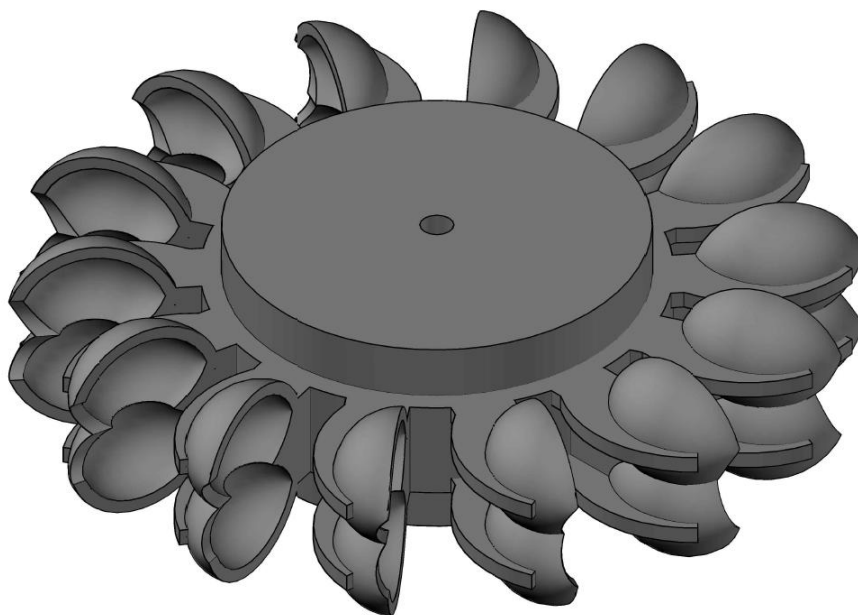


Obr. 5.8: Postup vytvoření lopatky Peltonovy turbíny



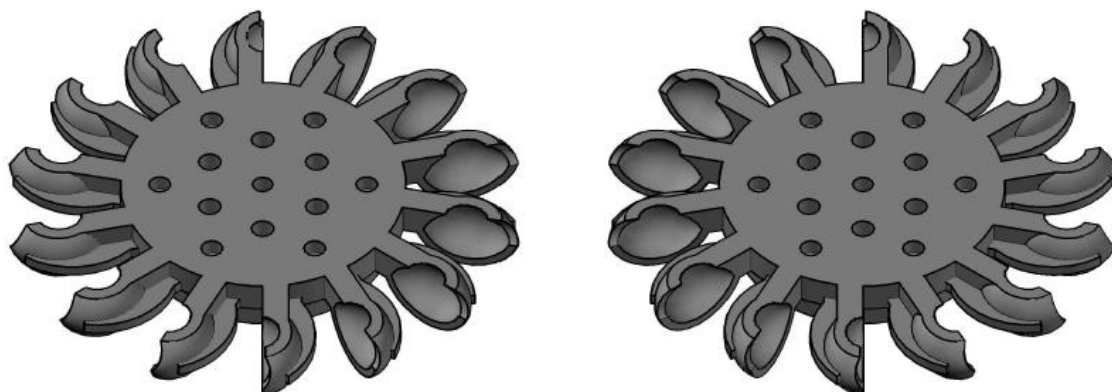
Obr. 5.9: Detail lopatky Peltonovy turbíny

Náboj byl vytvořen vytažením kružnice. Na okraj kružnice byla umístěna lopatka. Příkazem pole pak bylo vytvořeno pole 14 lopatek. V původním návrhu byla turbína v celku s plným nábojem. Tento model lze vidět na obrázku 5.10. Náboj je stejně široký jako lopatka z důvodu jednoduššího tisku.



Obr. 5.10: Původní model Peltonovy turbíny

V rámci optimalizace pro tisk bylo třeba oběžné kolo rozdělit na dvě poloviny v rovině břítu lopatky. Zároveň byly doplněny odlehčující otvory náboje (vnitřní šestice, skrz celý náboj). Dále byly vymodelovány centrující otvory (soustava otvor - čep - otvor, otvory jsou slepé), čep je vytvořen samostatně. Tisk polovin probíhal od středu kola ke kraji, nebylo tedy možné použít soustavu čep-otvor, jako u vodního kola. Modely dvou polovin pro tisk jsou na obrázku 5.11.



Obr. 5.11 Model Peltonovy turbíny pro tisk

5.5 Model propelerové turbíny

Dalším zástupcem turbín pro modelování je propelerová turbína. Model byl zvolen vzhledem k zjednodušení regulace oproti Kaplanově turbíně a jejím možnostem využití v MVE.

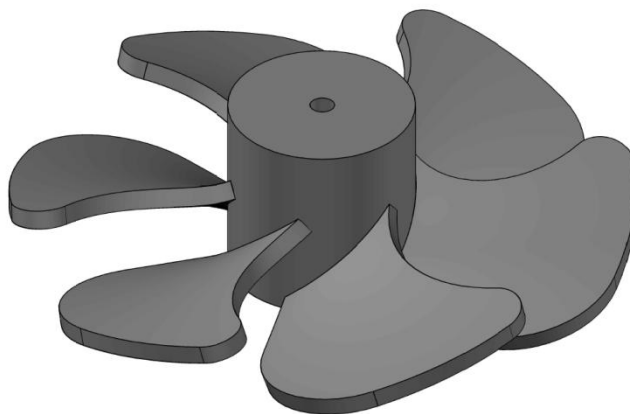
Nejprve se věnujme návrhu a vytvoření oběžného kola. Kolo by mělo být ze dvou částí, a sice náboje s lopatkami a čepičky. Místo hřídele byla použita závitová tyč M4, na jejím konci je matice, aby turbína nespadla. Čepička v sobě má otvor pro tuto matici a má jí zakrýt. Ke spodní části náboje se tedy přilepí. Postup vytvoření lopatky lze vidět na obrázku 5.12. Samotná lopatka byla vytvořena vytažením čáry po šroubovici. Následně

byl tvar shora nakreslen do roviny XY a vytažen tak, aby protínal plochu vzniklou vytažením čáry. Nástrojem průnik pak byla vytvořena lopatka.

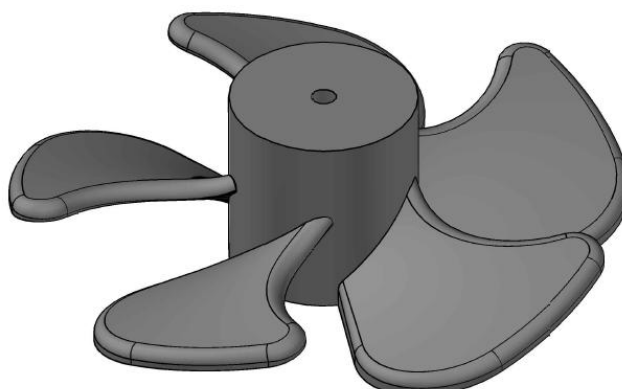


Obr. 5.12: Postup vytvoření lopatky propelerové turbíny

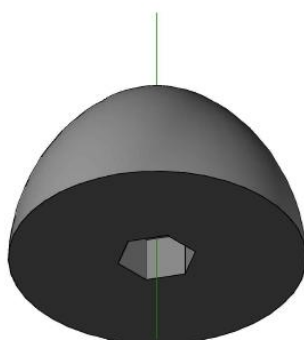
Po vytvoření lopatky je třeba ji přiřadit tloušťku, což lze udělat nástrojem zesil. Poté lze polárním polem vytvořit další lopatky. V původním návrhu bylo lopatek 6, jak lze vidět na obrázku 5.13. Nakonec byl počet lopatek snížen na 5 a hrany byly zaobleny. Výsledné oběžné kolo lze vidět na obrázku 5.14. Oběžné kolo je třeba tisknout s podpěrami, protože lopatky jsou částečně ve vzduchu. Čepičku pro zakrytí matice pak nalezneme v obrázku 5.15.



Obr. 5.13: Původní oběžné kolo propelerové turbíny



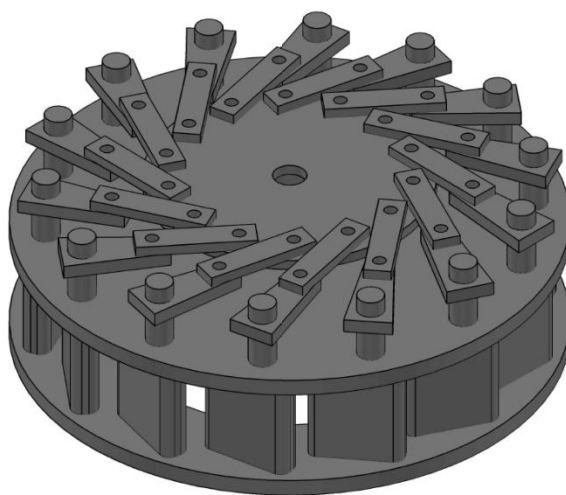
Obr. 5.14: Upravené oběžné kolo propelerovy turbíny



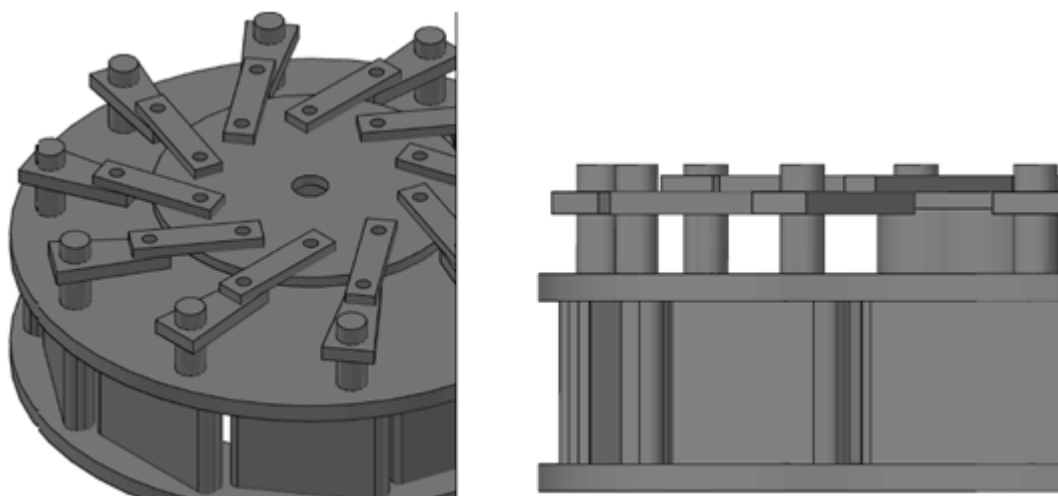
Obr. 5.15: Čepička oběžného kola s otvorem pro matici

Dále byl vymodelován regulátor, který je pohyblivý. Sestává z několika částí. Spodní víko regulátoru, horní víko regulátoru a regulační kolo. Regulační kolo má vytvořený pojezd, který zapadá do drážky v horním regulačním kruhu. Mezi víky regulátoru jsou umístěny regulační lopatky. Regulační lopatky se otáčejí na pevném čepu, který prochází otvory v dolním a horním víku. Horní část čepu lopatky je dvojicí táhel spojena s regulačním kruhem. Detaily jednotlivých částí regulátoru lze vidět v přílohách.

Části regulátoru byly modelovány výhradně operacemi základní geometrie, vytažením a množinovými příkazy. Rozměry lopatek byly navrženy tak, aby dokázaly uzavřít regulátor. Části byly postupně modelovány a vkládány do soustavy, jejíž původní návrh můžeme vidět na obrázku 5.16. Tento regulátor má celkem 14 lopatek. Je vidět, že vzhledem k hustotě táhel, již není na regulačním kruhu žádné místo. Počet lopatek byl tedy snížen na 10 a byly prodlouženy, aby uzavíraly regulátor. Nový návrh můžeme vidět na obrázku 5.17.

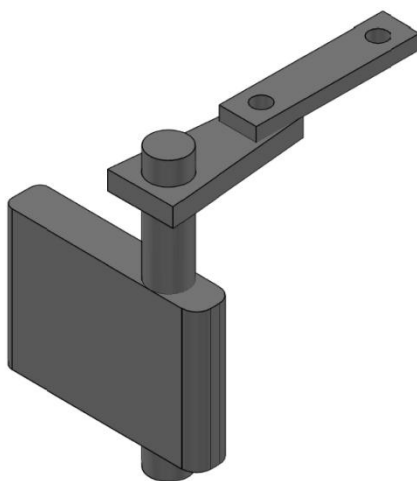


Obr. 5.16: Původní návrh regulátoru

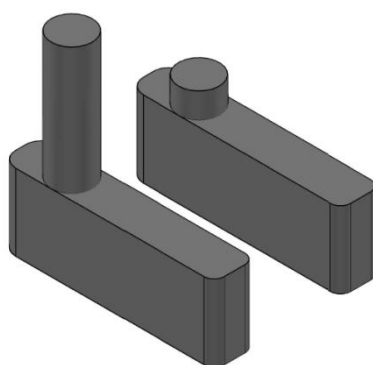


Obr. 5.17: Detail regulátoru

Podívejme se na detail samotné lopatky s táhly, který je na obrázku 5.18. Lopatku bylo třeba pro tisk upravit, jelikož nešla umístit tak, aby šla spolehlivě vytisknout. Při umístění na ležato by hrozilo utržení první vrstvy od tiskové podložky, protože strana válce se jí dotýká jen malou plochou. Lopatka tedy byla rozdělena pro tisk na dvě poloviny, jak můžeme vidět na obrázku 5.19 a tisknuta tak, aby obě strany čepu narůstaly v kladném směru osy Z.

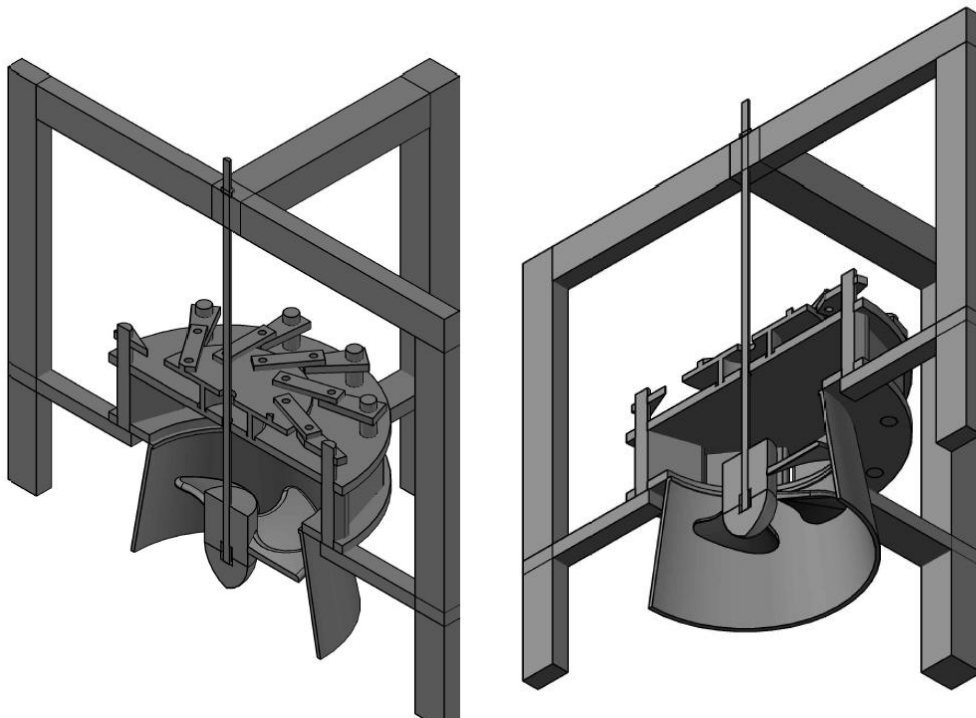


Obr. 5.18: Detail lopatky s táhly



Obr. 5.19: Rozříznutá lopatka pro tisk

Pro ilustraci byla vytvořena celková soustava včetně principu zavěšení turbíny. Model v řezu je na obrázku 5.20. Součástí je ukázka zavěšení do dřevěného rámu. Rám podpírá regulátor, který také sedí na savce.

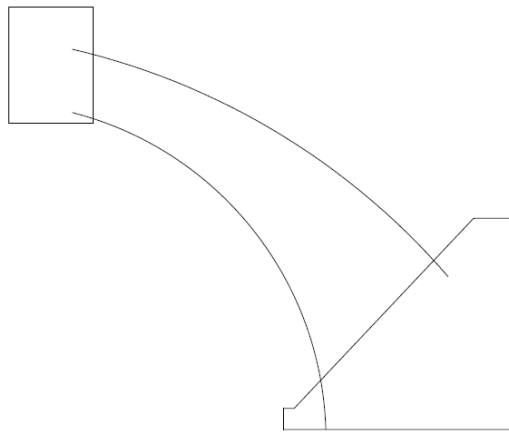


Obr. 5.20 Dva pohledy na celkovou vizualizaci modelu

5.6 Model Francisovy turbíny

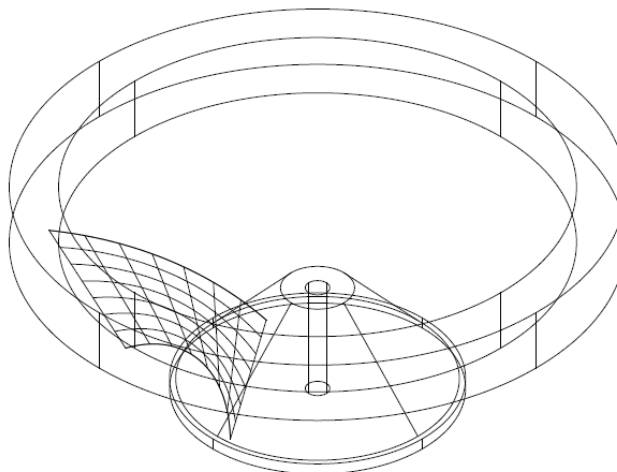
Poslední modelovaný zástupce turbín je Francisova turbína, zvolená hlavně kvůli svému častému využití v rámci přečerpávacích elektráren.

Nejdříve se z profilu vymodeloval řez náboje a vnějšího věnce a průmět lopatky do roviny. Výchozí tvar můžeme vidět na obrázku 5.21.



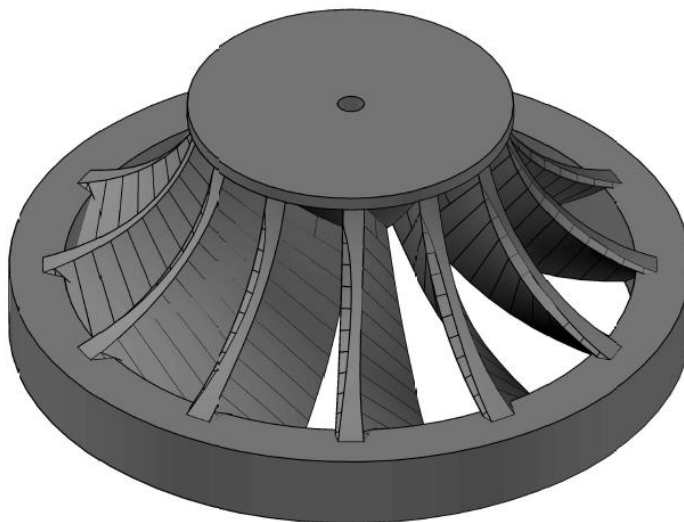
Obr. 5.21 Výchozí náskres pro model Francisovy turbíny

Následně je třeba pootočit horní část lopatky kolem osy náboje, aby se dal vytvořit náklon. Vzájemně pootočené části kružnic, tvořící hrany lopatek, je třeba spojit nástrojem šablonování, který vytvoří přechod z jedné čáry do druhé. Horní a dolní kruh se vytvoří rotací kolem osy. Výsledek těchto operací lze vidět na obrázku 5.22.



Obr. 5.22 Vytvoření lopatky Francisovy turbíny

Nyní již stačí lopatce nástrojem zesil přiřadit tloušťku a vytvořit příkazem pole ostatní lopatky. Oběžné kolo obsahuje celkem 12 lopatek. Turbína je řešena tak, aby rozměrově seděla do otočného regulátoru, který je součástí modelu propelerové turbíny. Uchycení je taktéž na podobném principu. Výsledné oběžné kolo je na obrázku 5.23.



Obr. 5.23: Oběžné kolo Francisovy turbíny

Závěr

V první, úvodní části práce jsem se věnovala energii vody. Uvedla jsem základní rovnici pro teoretický výkon vodního toku a její odvození.

V následující kapitole jsem rozebírala základní principy vodních elektráren. Nejdříve jsem se věnovala způsobům soustředění spádu a průtoku a rozdělení elektráren podle několika hledisek. Dále jsem se zabývala jednotlivými druhy elektráren a principem jejich činností. Popsala jsem princip přehradních a jezových elektráren, dále přečerpávacích, derivačních, přehradně derivačních a přílivových.

Další část práce jsem věnovala teorii vodních motorů. Kapitola je rozdělena na část turbíny a část vodní kola. V podkapitole turbíny jsem rozebírala způsoby rozdělení turbín a jejich základní parametry, včetně energetické bilance. Poté jsem se věnovala popisu jednotlivých významných typů turbín, principům jejich funkce a konstrukčním řešením. Byly zde popsány tyto turbíny: Francisova, Kaplanova a odvozené konstrukce, Reiffensteinova a její varianty, Peltonova, Turgo, Bánkiho, Savoniova a Archimédův šroub. Kromě principů funkce a konstrukce jsou zde také uvedeny možnosti jejich využití v praxi. Druhá podkapitola, vodní kola, je rozdělena na lopatková a korečková. Ke každé části jsem uvedla zástupce daného druhu a jeho princip. Mezi představená lopatková kola patří konstrukčně nejjednodušší hřebenáč a složitější Poncelotovo kolo. Jako zástupce korečkových kol jsem popsala horní korečník.

Ve čtvrté kapitole jsem vybrala zajímavé vodní elektrárny ve světě a v České republice. Světové elektrárny jsem vybírala s ohledem na "rekordy", a sice elektrárnu s největším instalovaným výkonem, s největším objemem roční výroby elektrické energie, s nejvyšší hrází, s největším instalovaným výkonem na přečerpávací elektrárně. K těmto elektrárnám jsem uvedla jejich české ekvivalenty a porovnávala je mezi sebou. V závěru kapitoly je shrnující tabulka se světovými a českými rekordy (tab. 4.3).

Poslední, praktická část je věnována přípravě a realizaci modelů vodních motorů. V úvodu kapitoly jsem popisovala základní princip 3D tisku a způsob práce v programu

AutoCAD, který byl použit pro přípravu modelů. Celkem jsem připravila čtveřici modelů. Součástí kapitoly jsou postupy vytvoření modelů a v přílohách lze najít dokumentaci.

První model je zástupcem vodních kol, a sice horní korečník. Model korečníku jsem nejdříve vytvořila jako celek a pak jsem jej pro potřeby 3D tisku upravila. Ke korečníku jsem dále vytvořila přivaděč vody s výřezy pro umístění regulačního stavidla. Korečník jsem vymodelovala s 16 lopatkami.

Druhým modelem je Peltonova turbína. Zde jsem vymodelovala samostatnou lopatku, kterou jsem umístila na náboj, po vytvoření pole lopatek (celkem 14) stačilo lopatky sloučit s nábojem a model byl hotový. Pro potřeby 3D tisku jsem jej upravila rozříznutím na dvě části dle osy břitu lopatky. Náboj jsem doplnila soustavou odlehčovacích otvorů a centrovacích bodů díra - čep - díra.

Jako třetí model jsem vytvořila propelerovou turbínu. Oběžné kolo s pěti lopatkami jsem složila ze dvou částí: oběžného kola a krytu uchycení. Dále jsem vymodelovala pohyblivý přivaděč pro regulaci. Přivaděč jsem provedla z několika částí, obsahuje dolní víko, horní víko a regulační kruh. Mezi víka, která v sobě mají otvory, jsou umístěny regulační lopatky na pevných čepech. Lopatky jsem pro potřeby 3D tisku složila ze dvou polovin. Připojení lopatky k regulačnímu kruhu jsem udělala pomocí dvojice táhel.

Poslední model je Francisova turbína. Turbínu jsem vymodelovala tak, aby k ní šel použít stejný regulovatelný přivaděč, jako v případě propelerové turbíny. Oběžné kolo obsahuje celkem 12 lopatek.

Modely jsou vytvořeny pro demonstraci základního principu funkce a nejsou řešeny z hlediska efektivnosti návrhu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DUŠIČKA, GABRIEL, HODÁK, ČIHÁK, ŠULEK. *Malé vodní elektrárny*. Bratislava: Jaga group, v. o. s., 2003. ISBN 80-88905-45-1.
- [2] ŠKORPIL, Kasárník. *Obnovitelné zdroje energie I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-675-4.
- [3] MELICHAR, VOJTEK, BLÁHA. *Malé vodní turbíny*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01808-0.
- [4] VOBOŘIL, David. Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *O energetice* [online]. 2016 [vid. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [5] HÁJEK, Gustav. *Vodní motory*. Praha: Vydavatelstvo ROH, 1951.
- [6] KLECZEK, Josip. Teplo vody a její pohybová energie. *tzbinfo* [online]. 2007 [vid. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/4184-teplo-vody-a-jeji-pohybova-energie>
- [7] AUBRECHT, Jan. *Vývoj vodních elektráren*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra Technologií a měření.
- [8] MORÁVEK, Jan. *Návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny*. Brno, 2009. Bakalářská Práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [9] Derivační vodní elektrárna. *cez* [online]. 1999 [vid. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/deriv_vod_el.html
- [10] Vodní elektrárny. *Internetový portál elektrotechnika* [online]. [vid. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=2253>
- [11] ČEZ zvažuje stavbu přečerpávací elektrárny na Orlíku. Má skladovat přebytky solární energie. *solarninovinky* [online]. 2014 [vid. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/?home/2014060302/cez-zvazuje-stavbu-precerpavaci-elektrarny-na-orliku-ma-skladovat-prebytky-solarni-energie>
- [12] KRÁLOVÁ, Magda. Přílivová elektrárna. *Techmania* [online]. [vid. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/660>
- [13] Přílivová vodní elektrárna. *energyweb* [online]. [vid. 2018-03-18]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=priliv_el.html
- [14] MACHÁT, Pavel. *Vodní turbíny a jejich využití*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [15] Francisova horizontální turbína. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-horiz.htm>
- [16] Francisova vertikální turbína. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-vertik.htm>
- [17] JOSEF, Vlastimil. Kaplanova turbína. *Vodní turbíny* [online]. [vid. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.vodniturbiny.cz/index.php?linkid=08>
- [18] *Kaplanova turbína* [online]. 2017 [vid. 2018-04-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turbína
- [19] VINTR, Martin. *Malé vodní elektrárny kašnového typu*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.

- [20] Reiffensteinova turbína. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/reiffenstein.htm>
- [21] Peltonova turbína [online]. [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://cz.all.biz/peltonova-turbina-g33374>
- [22] Turbína Turgo. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/turgo.htm>
- [23] Turgo turbines [online]. [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.turbinesinfo.com/turgo-turbines/>
- [24] Bánkiho turbína [online]. [vid. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [25] SCHMIDT, Filip. *Návrh malé vodní elektrárny*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, katedra energetických strojů a zařízení.
- [26] Bánkiho turbína. *Čez* [online]. [vid. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/banki_turb.html
- [27] Archimédův šroub. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/jineturbiny/archimedes.htm>
- [28] *Archimédův šroub* [online]. [vid. 2018-04-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Archimédův_šroub
- [29] RANC, David. *Návrh malé vodní elektrárny*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrické mechaniky a výkonové elektroniky.
- [30] TŮMA, Jan. Archimédův šroub v roli vodní turbíny. *technický portál* [online]. [vid. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/archimeduv-sroub-v-rolí-vodni-turbiny_37014.html
- [31] KAILASH, Golecha, T. I. ELDHO a S. V. PRABHU. Performance study of modified savonius water turbine with two deflector plates. *International Journal of Rotating Machinery* [online]. 2012 [vid. 2018-05-06]. Dostupné z: doi: 10.1155/2012/679247
- [32] Savoniusova turbína. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/jineturbiny/savonius.htm>
- [33] *Typy turbín* [online]. [vid. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/12.html>
- [34] *A Novel Parametric Modeling Method and Optimal Design for Savonius Wind Turbines* [online]. 2017 [vid. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/3/301>
- [35] Hřebenáč. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/vodnikolaDD/hrebenac.htm>
- [36] *Velké staré dřevěné vodní mlýnské kolo do zahrady* [online]. [vid. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://archiv.aukro.cz/velke-stare-drevene-vodni-mlynske-kolo-do-zahrady--i4315639516>
- [37] Ponceletovo vodní kolo. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/vodnikolaDD/poncelet.htm>
- [38] Vodní hřiště. *Netradiční hřiště* [online]. [vid. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.netradicnihriste.cz/cs/ponceletovo-kolo>
- [39] Korečník na horní vodu. *mve energetika* [online]. [vid. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/vodnikolaHD/korecnikHD.htm>

- [40] *Korečník na horní vodu* [online]. [vid. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/autor/navrh-korecnik-pracharna.htm>
- [41] *Tři soutěsky - královna všech elektráren. oenergetice* [online]. 2015 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/tri-soutesky-kralovna-vsech-elektraren/>
- [42] *Stavba, která nemá obdoby? Tři soutěsky změnilly rotaci Země. eurozpravy.cz* [online]. 2017 [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://zahranicni.eurozpravy.cz/asia-a-australie/186314-stavba-ktera-nema-obdoby-tri-soutesky-zmenily-rotaci-zeme/>
- [43] *Hydroelektrárna Itaipú – sedmkrát Temelín v jediné hrázi. elektro* [online]. [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/hydroelektrarna-itaipu-sedmkrat-temelin-v-jedine-hrazi--12790>
- [44] *Itaipu Dam. wikipedia* [online]. 2018 [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Itaipu_Dam
- [45] *BUDÍN, Jan. Deset největších vodních elektráren na světě. oenergetice* [online]. 2015 [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/deset-nejvetsich-vodnich-elektraren-na-svete/>
- [46] *Bath County Pumped Storage Station. wikipedia* [online]. 2018 [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bath_County_Pumped_Storage_Station
- [47] *KORONOWSKI, Ryan. The Inside Story Of The World's Biggest 'Battery' And The Future Of Renewable Energy. thinkprogress.org* [online]. 2013 [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://thinkprogress.org/the-inside-story-of-the-worlds-biggest-battery-and-the-future-of-renewable-energy-8984e81283c/>
- [48] *Project : Bath County Pumped Storage Station Deformation Monitoring. chacompanies.com* [online]. [vid. 2018-05-28]. Dostupné z: <http://www.chacompanies.com/projects/bath-county-pumped-storage-station-deformation-monitoring/>
- [49] *WU, Shi yong, Wei CAO a Jiang ZHENG. Analysis of working behavior of Jinping-I Arch Dam during initial impoundment. Water Science and Engineering* [online]. 2016 [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wse.2016.11.001
- [50] *SHIYONG, Wu, Shen MANBIN a Wang JIAN. Jinping hydropower project: Main technical issues on engineering geology and rock mechanics. Bulletin of Engineering Geology and the Environment* [online]. 2010 [vid. 2018-05-24]. Dostupné z: doi: 10.1007/s10064-010-0272-4
- [51] *The Jinping-I Double Curvature Arch Dam sets new world record. powerchina.cn* [online]. 2016 [vid. 2018-02-25]. Dostupné z: http://en.powerchina.cn/2016-12/28/content_27870606.htm
- [52] *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. cez* [online]. [vid. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>
- [53] *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně zaznamenala loni rekordní výrobu. oenergetice* [online]. 2017 [vid. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-dlouhe-strane-zaznamenala-loni-rekordni-vyrobu/>
- [54] *Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice. cez* [online]. [vid. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dalesice.html>
- [55] *Vodní elektrárna Orlik. cez* [online]. [vid. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/orlik.html>

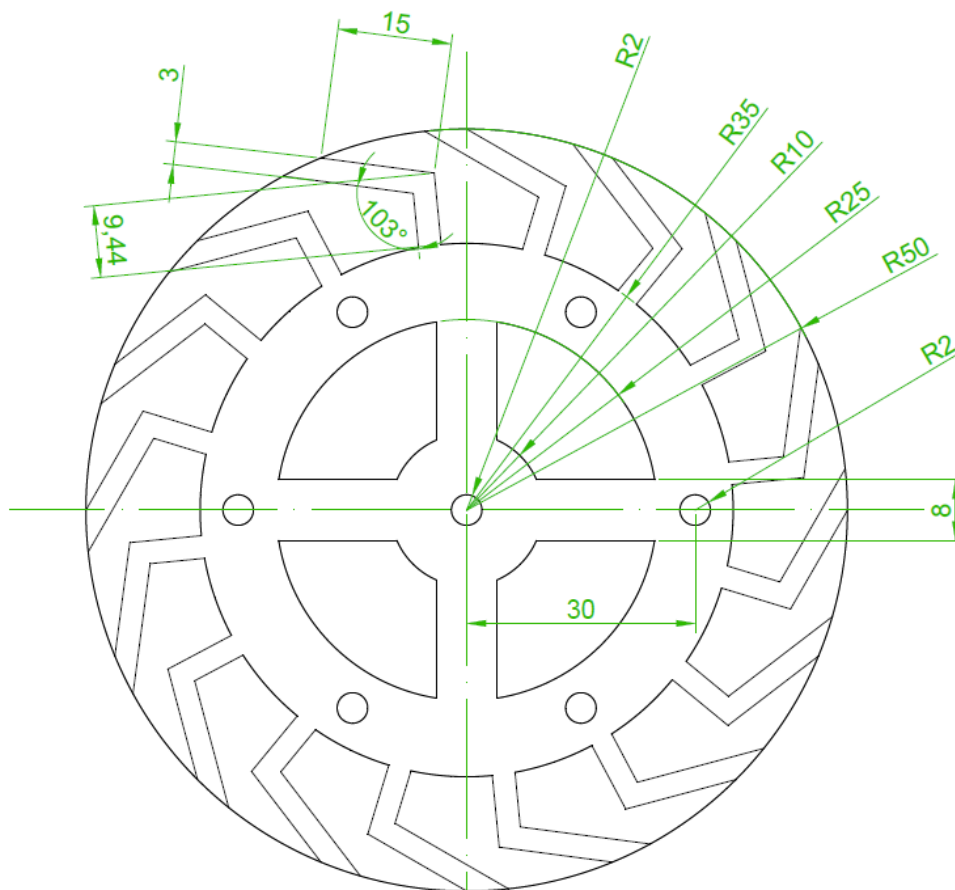
- [56] Vodní elektrárna Orlick. *wikipedia* [online]. 2017 [vid. 2018-05-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodní_elektrárna_Orlík
- [57] Unikátní transplantace: Lékaři v Brně voperovali pacientovi lopatku vyrobenou pomocí 3D tisku. *ceskatelevize.cz* [online]. 2018 [vid. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/regiony/2485951-unikatni-transplantace-lekari-v-brne-voperovali-pacientovi-lopatku-vyrobenu-pomoci>

Přílohy

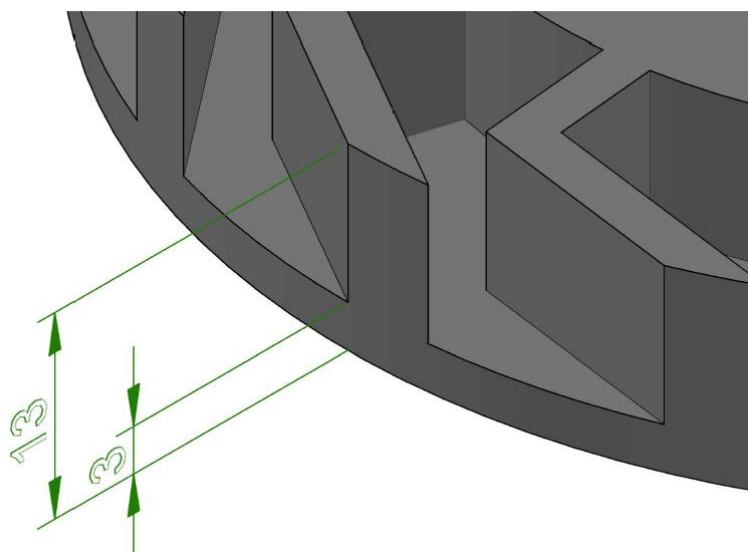
Příloha A: Výkresy pro model vodního kola	b-c
Příloha B: Výkresy pro model Peltonovy turbíny	d
Příloha C: Výkresy pro model propelerovy turbíny a regulátoru	e-j
Příloha D: Výkresy pro model Francisovy turbíny	k-l
Příloha E: CD nosič	l

Příloha A: výkresy pro model vodního kola

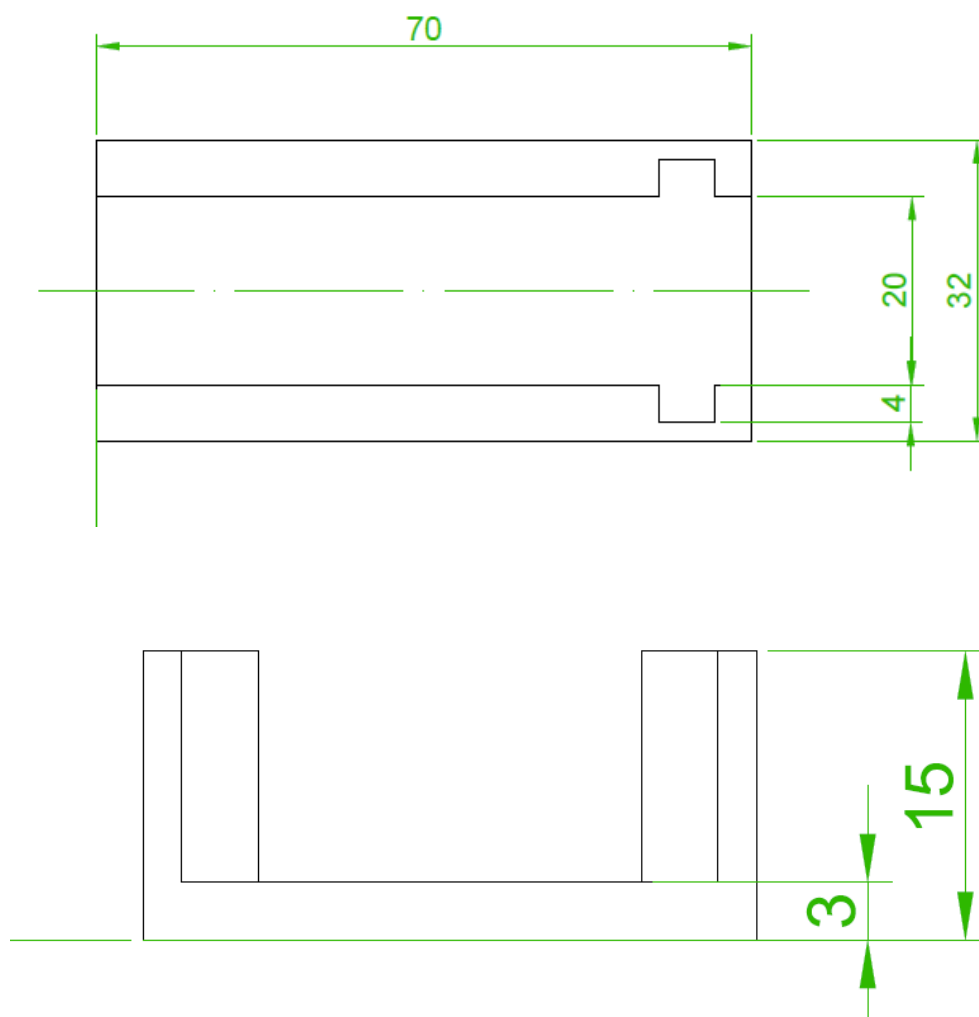
Pro výkres byla použita jedna polovina kola, výška celkového modelu je tedy dvojnásobná. Šestice kružnic R2 představuje centrovací body, slouží pro potřeby slepení kola.



Detail poloviny kola s rozměry.

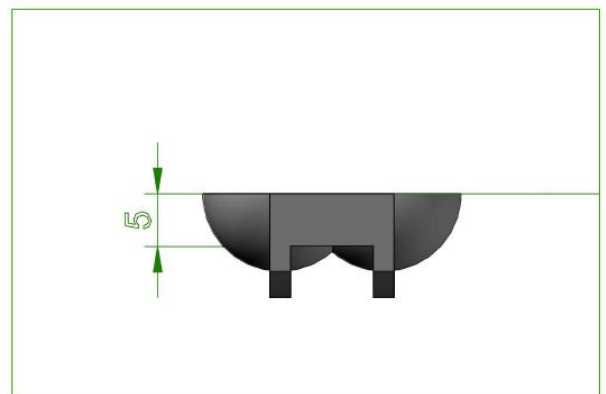
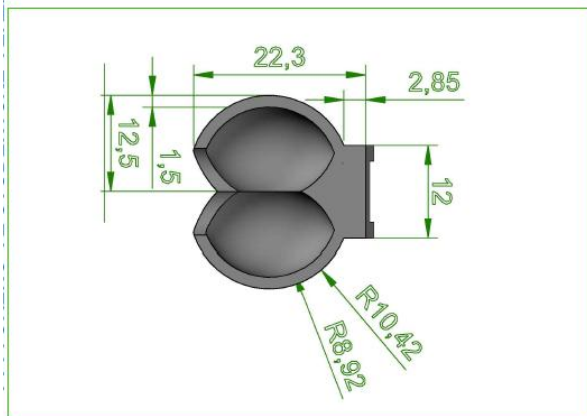
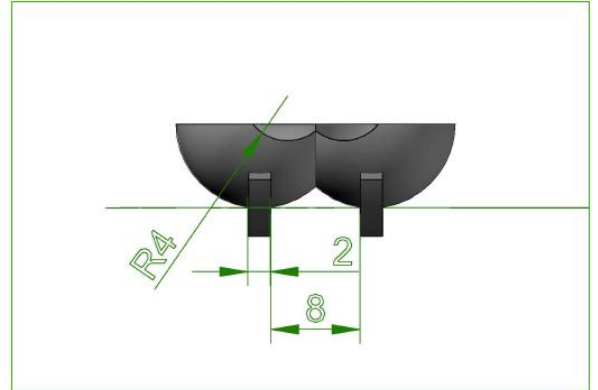
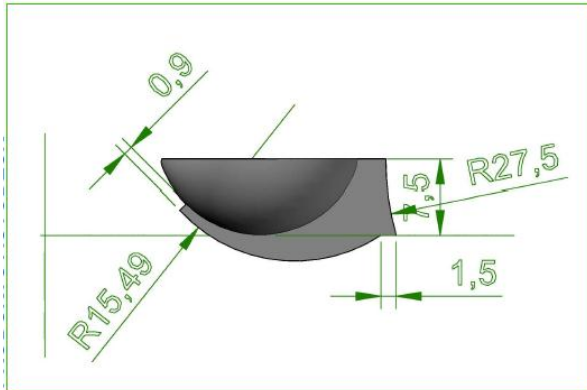


Přiváděč vody ke kolu. Pohled shora a ze strany.

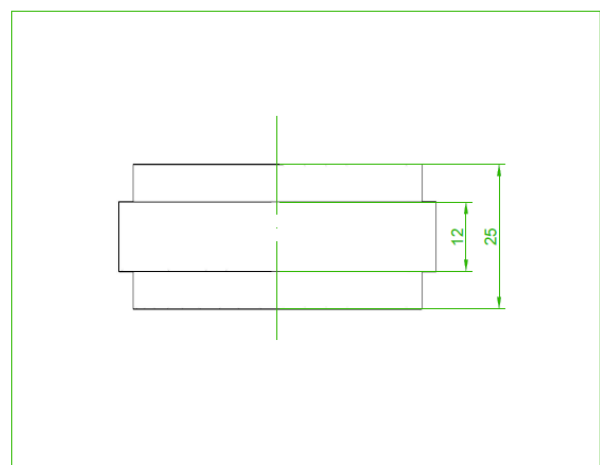
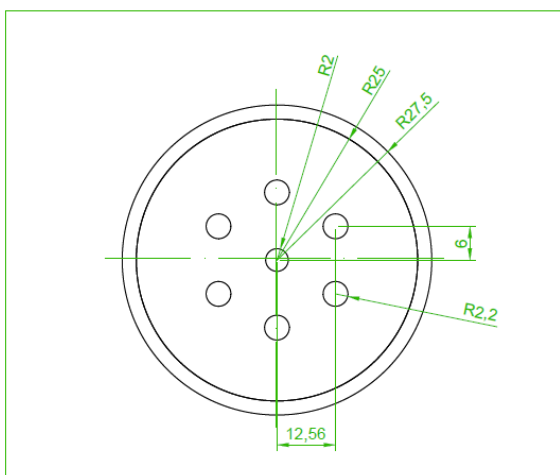


Příloha B: Výkresy pro model Peltonovy turbíny

Lopatka ze čtyř stran.

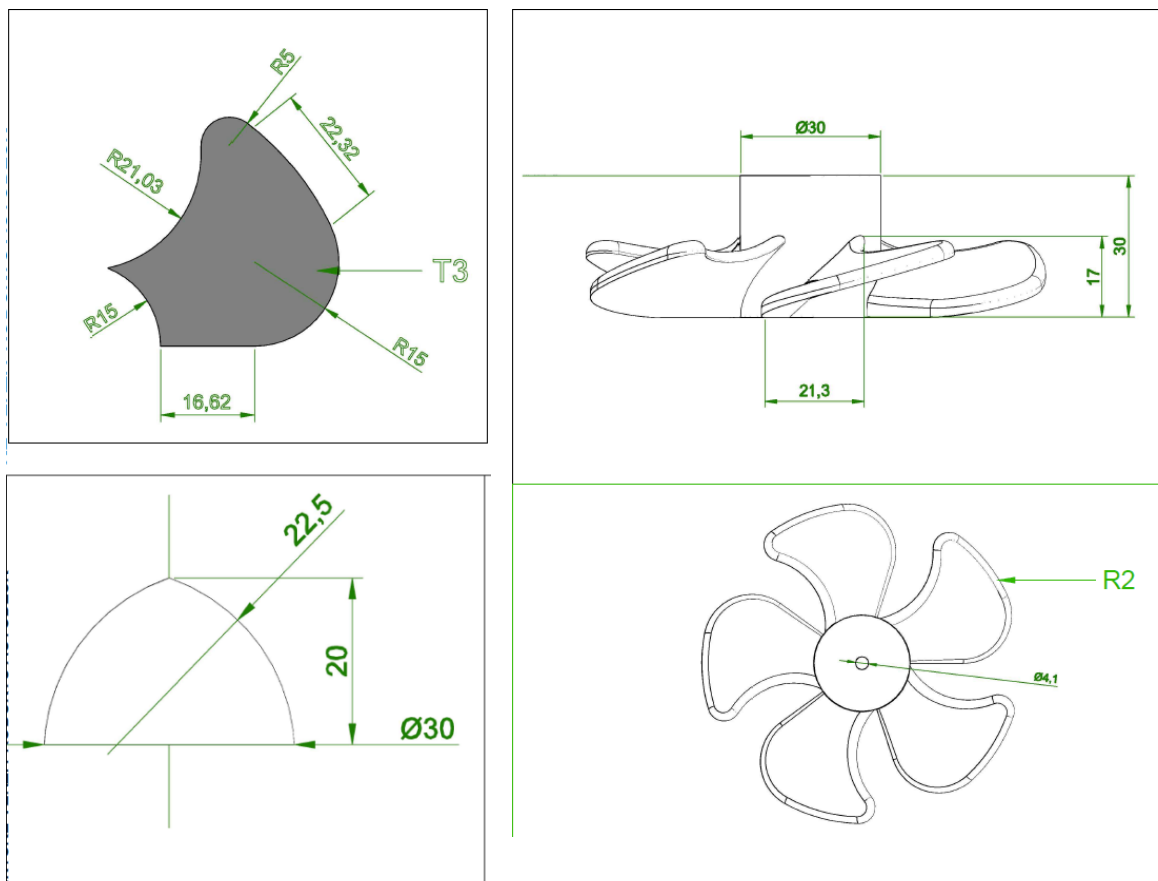


Náboj oběžného kola.



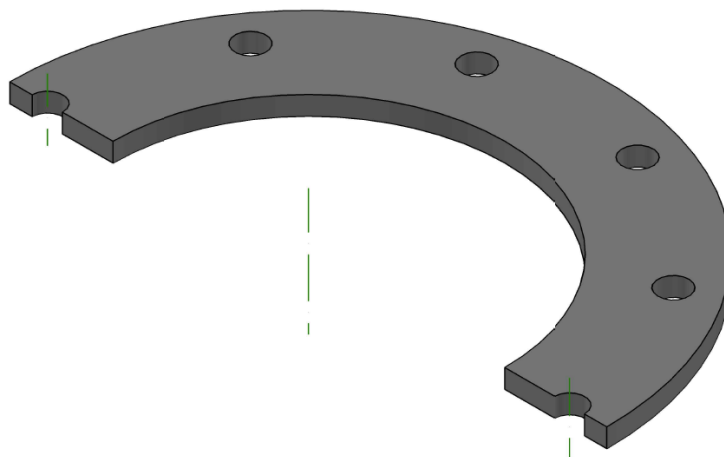
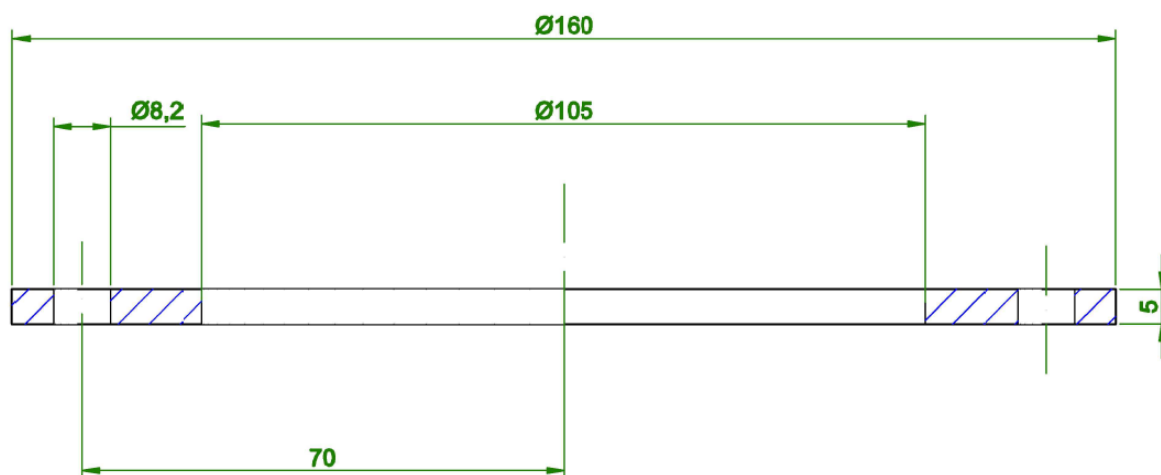
Příloha C: výkresy pro model propelerovy turbíny a regulátoru

Oběžné kolo s čepičkou. První výkres je průmět lopatky do roviny. Druhý výkres je oběžné kolo z boku. Třetí výkres je kryt uchycení turbíny. Na čtvrtém je pohled na oběžné kolo shora.

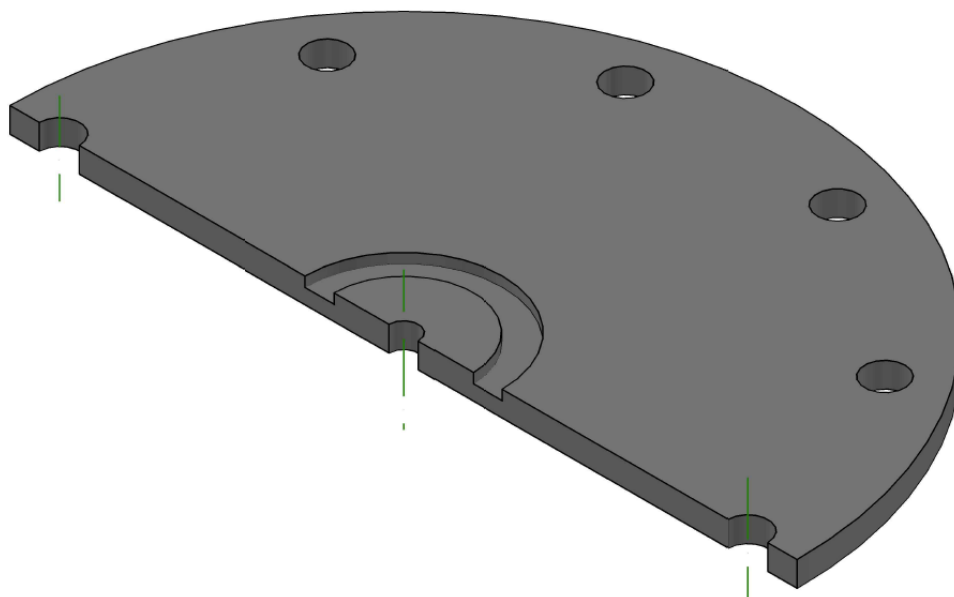
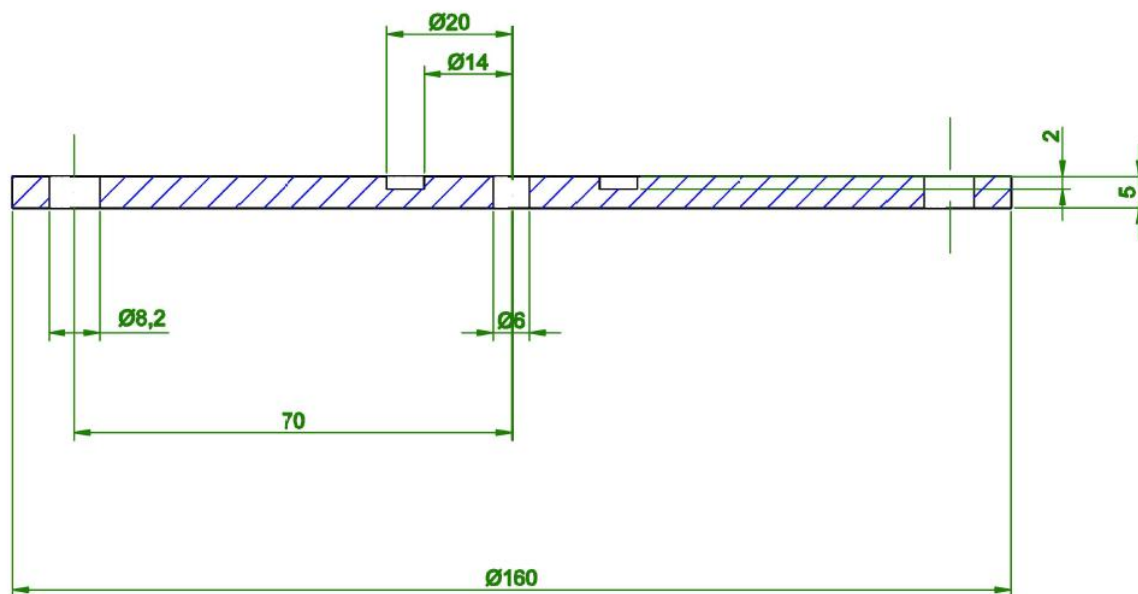


Následují jednotlivé části regulátoru.

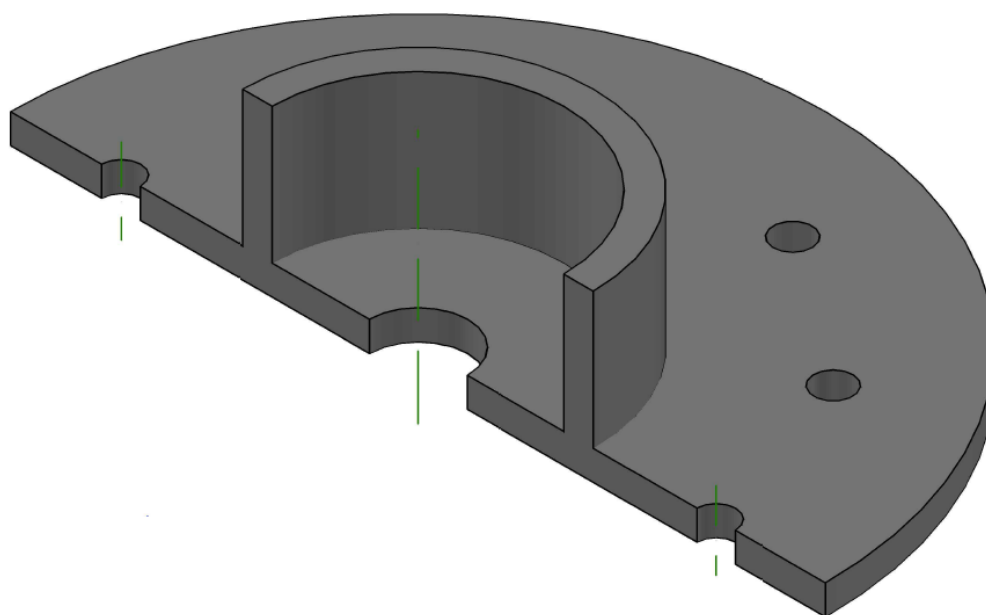
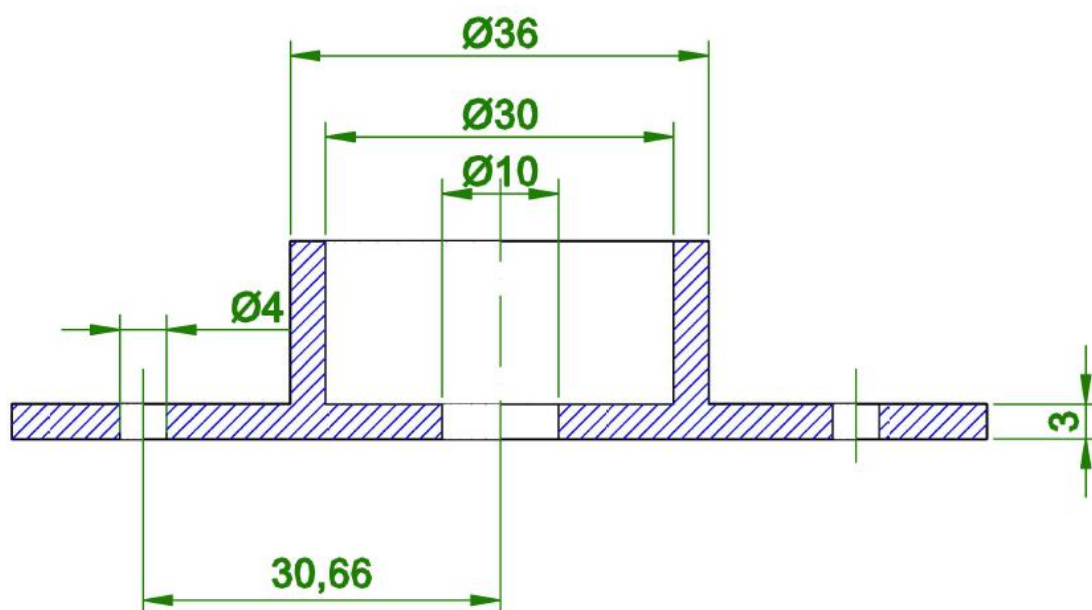
Spodní kolo regulátoru v řezu.



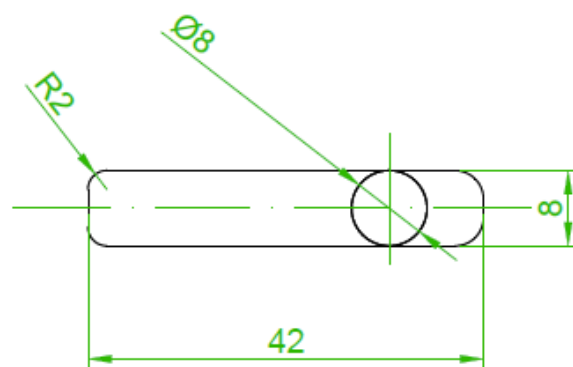
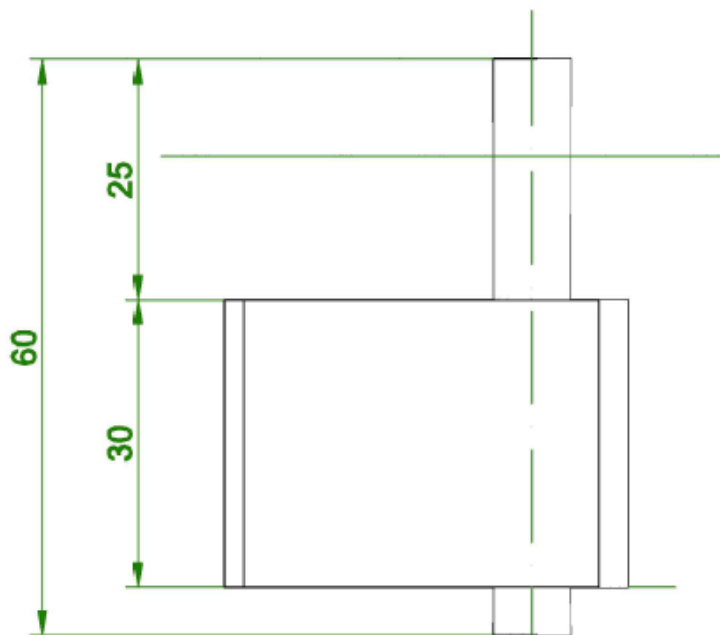
Horní kolo regulátoru v řezu.



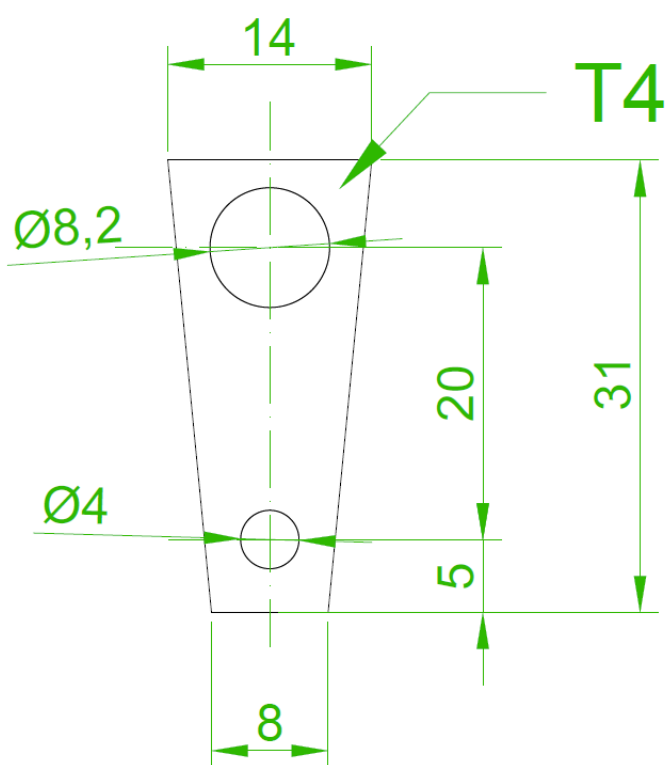
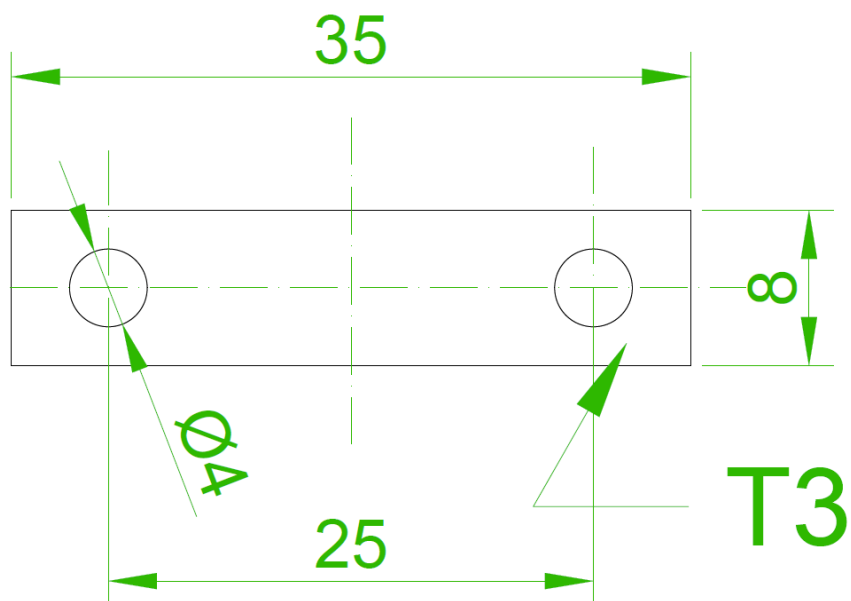
Regulační kolo v řezu.



Regulační lopatka: Pro potřeby tisku byla rozříznuta na dvě poloviny dle středu lopatky tak, aby při tisku oba válce (čepy) narůstaly směrem nahoru.

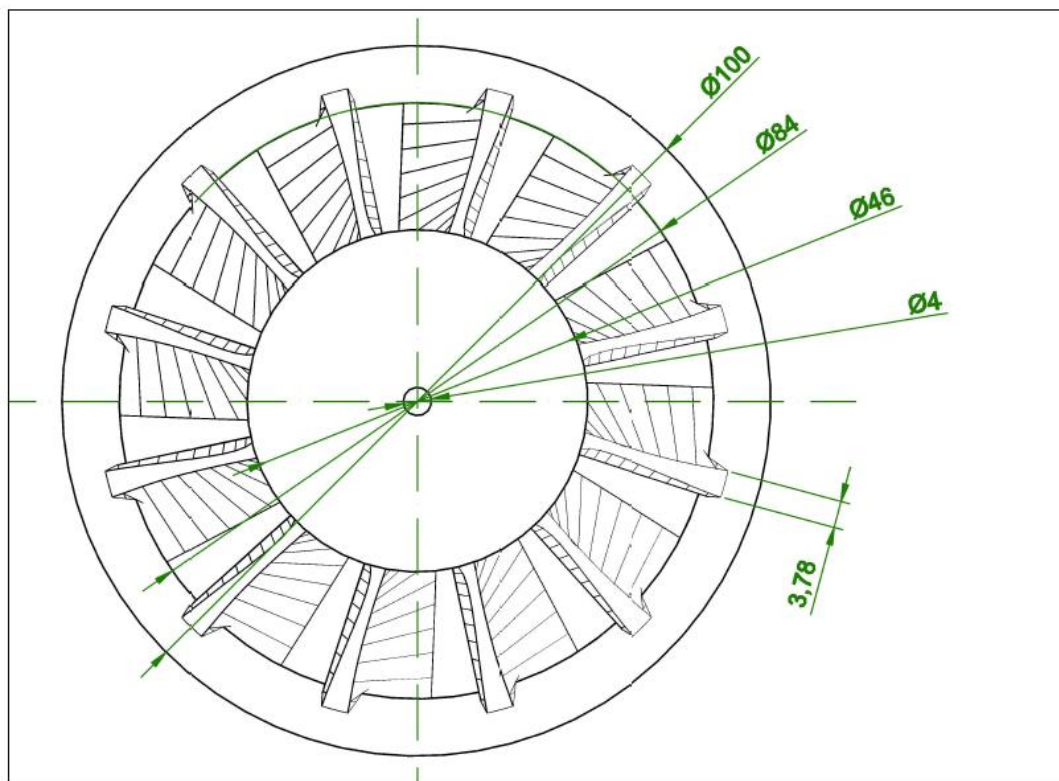


Táhla lopatek:

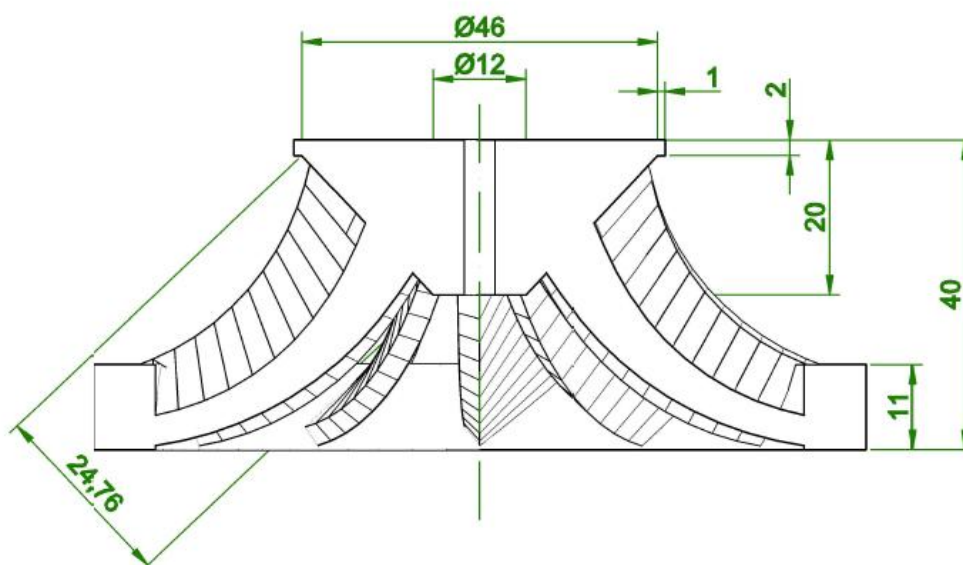


Příloha D: výkresy oběžného kola Francisovy turbíny

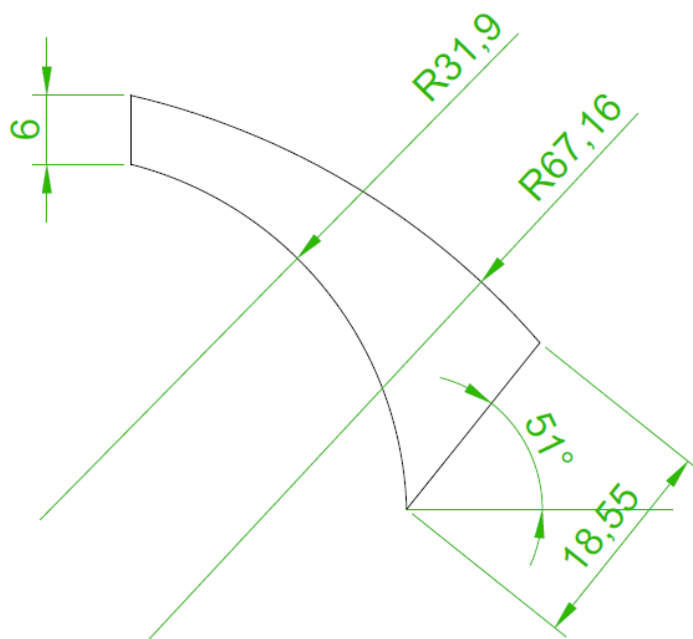
Pohled na oběžné kolo shora.



Pohled na oběžné kolo zepředu v řezu.



Průmět lopatky Francisovy turbíny do roviny.



Příloha E: CD nosič

Obsahuje digitální verzi bakalářské práce a jednotlivé výkresy.