

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

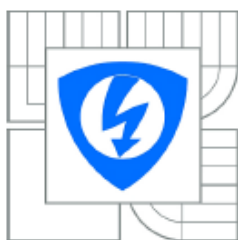
PROJEKT MODELU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

BC. JAROSLAV URBÁNEK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Jaroslav Urbánek
Ročník: 2

ID: 125681
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Projekt modelu malé vodní elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše a úvod do problematiky.
2. Návrh konstrukce a principu funkce modelu vodní elektrárny.
3. Projekt mechanické části modelu.
4. Projekt elektrické části modelu.
5. Projekt řídicí a měřicí části modelu.
6. Konstrukce a oživení modelu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

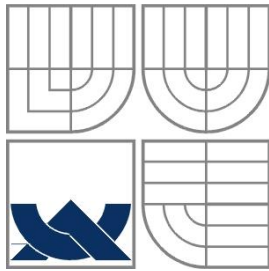
URBÁNEK, J. *Projekt modelu malé vodní elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 72 s.

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení k úspěšnému dokončení diplomové práce a dále mojí rodině za poskytnutí možnosti studovat tento obor.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

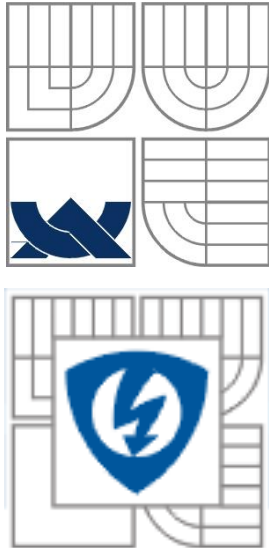
Projekt modelu malé vodní elektrárny

Jaroslav Urbánek

vedoucí: Ing. Lukáš Radil, Ph. D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

**THE PROJECT OF MODEL
HYDROELECTRIC POWER
PLANT**

by

Bc. Jaroslav Urbánek

Supervisor: Ing. Lukáš Radil, Ph. D.

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí malé vodní elektrárny pro laboratorní účely. Prvním krokem je vypočítání potřebných parametrů pro vytvoření 2D modelu Bánkiho turbíny. Další částí je návrh či výběr jednotlivých součástí modelu jako jsou generátor, kryt pro turbínu, vodní okruh, čerpadlo a uchycení alternátoru. Posledním krokem bylo zprovoznění vytvořeného modelu a ověřit zda model malé vodní elektrárny dosahuje požadovaných parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Bánkiho turbína, čerpadlo, generátor, malá vodní elektrárna, okruh vody

ABSTRACT

Master thesis consists of the construction of a small hydroelectric power play model for laboratory use. The first step is to calculate parameters required for the creation of the 2D model Banki turbine. Next part is a proposal and selection of individual components of the model, such as generator, turbine housing, water circuit, pump and alternator mounting. The last step is to launch the model and verify, if the model of a small hydroelectric power plant achieves the required parameters.

KEY WORDS:

Banki-Mitchell turbine, water pump, generator, small hydroelectric power plant, water circuit

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 VODNÍ ENERGIE	15
2.1 ROZDĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN.....	15
3 POTŘEBNÉ PARAMETRY PRO MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	16
3.1 ENERGIE VODNÍHO TOKU	16
3.2 ZÁKLADNÍCH PARAMETRY	18
3.2.1 PRŮTOK TURBÍNOU	18
3.2.2 SPÁD TURBÍNY	19
3.2.3 VÝKON TURBÍNY.....	19
3.2.4 OTÁČKY TURBÍNY A SOUSTROJÍ.....	20
3.2.5 ÚČINNOST TURBÍNY	20
4 TURBÍNY	21
4.1 KLASIFIKACE VODNÍCH TURBÍN	21
4.2 ROZDĚLENÍ TURBÍN PODLE PRŮTOKU VODY OBĚŽNÝM KOLEM.....	22
4.3 FRANCISOVA TURBÍNA.....	23
4.4 KAPLANOVA TURBÍNA	23
4.5 PELTONOVA TURBÍNA.....	24
4.6 BÁNKIHO TURBÍNA.....	25
5 NÁVRH KONSTRUKCE.....	26
5.1 ČERPADLO	26
5.2 NÁVRH BÁNKIHO TURBÍNY	27
5.2.1 KONSTRUKCE BÁNKIHO TURBÍNY	30
5.3 NÁVRH KRYTU PRO BÁNKIHO TURBÍNU	33
5.3.1 HYDRAULICKÝ VÝPOČET PŘÍVODU VODY	34
5.3.2 HYDRAULICKÉ ŘEŠENÍ SACÍ TROUBY	37
5.4 GENERÁTOR	39
5.4.1 ZAPOJENÍ ALTERNÁTORU.....	40
5.4.2 UCHYCENÍ GENERÁTORU	41
5.5 HŘÍDEL	42
5.6 PROPOJENÍ ALTERNÁTORU S TURBÍNOU	42
5.7 OKRUH VODY.....	43
5.8 KONSTRUKCE MODELU.....	44
6 MĚŘENÍ VÝSTUPNÍCH VELIČIN MODELU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	46
7 ŘÍZENÍ MODELU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	47
8 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM MODELU	49

9 ZÁVĚR.....	52
POUŽITÁ LITERATURA	54
SEZNAM PŘÍLOH.....	55
PŘÍLOHA A	56
PŘÍLOHA B.....	64
PŘÍLOHA C	67
PŘÍLOHA D	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Tlakový spád vodního toku</i>	17
<i>Obr. 2: Objemové měření průtoku (1–parciální obdélníkový ostrohranný měrný přeliv, 2–měrná nádoba kalibrovaná)</i>	19
<i>Obr. 3: Členění turbín dle způsobu přenosu energie (1-rozváděč, 2-oběžné kolo, 3-dýza, 4-zavzdušňovací otvory)</i>	21
<i>Obr. 4: Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem</i>	22
<i>Obr. 5: Francisova turbína [4]</i>	23
<i>Obr. 6: Kaplanova turbína [5]</i>	24
<i>Obr. 7: Peltonova turbína [5]</i>	24
<i>Obr. 8: Bánkiho turbína</i>	25
<i>Obr. 9: Charakteristika čerpadla Elpumps CT 4274[9]</i>	26
<i>Obr. 10: Čerpadlo Elpumps CT 4274</i>	27
<i>Obr. 11: Charakteristika L/D závislá na spádu [7]</i>	28
<i>Obr. 12: Světlost trubky</i>	29
<i>Obr. 13: Vizuelní rozložení jednotlivých parametrů Bánkiho turbíny [2]</i>	30
<i>Obr. 14: Vytvoření lopatky z vypočtené trubky</i>	31
<i>Obr. 15: 2D náčrt Bánkiho turbíny</i>	31
<i>Obr. 16: 3D model Bánkiho turbíny</i>	32
<i>Obr. 17: Prototyp Bánkiho turbíny vytvořený pomocí 3D tiskárny</i>	32
<i>Obr. 18: Rozměry vtokového otvoru</i>	33
<i>Obr. 19:Kryt turbíny</i>	33
<i>Obr. 20: Spirála pro turbínu [3]</i>	34
<i>Obr. 21: Pomocný náčrt a tvar nátoky pro turbínu</i>	35
<i>Obr. 22: Tvar přivaděče</i>	36
<i>Obr. 23: Kryt turbíny s přivaděčem</i>	36
<i>Obr. 24: Rozměry savky</i>	38
<i>Obr. 25: Polovodičové diody</i>	39
<i>Obr. 26: Alternátor Magnetron</i>	39
<i>Obr. 27: Modifikace alternátoru</i>	40
<i>Obr. 28: Schéma zapojení alternátoru</i>	40
<i>Obr. 29: Uchycení alternátoru</i>	41
<i>Obr. 30:Spojka</i>	42
<i>Obr. 31:Okruh vody</i>	43

<i>Obr. 32: Úhelníkový spoj [10]</i>	44
<i>Obr. 33: Rohový spoj [10]</i>	44
<i>Obr. 34: Počítačový model a reálný vzhled</i>	45
<i>Obr. 35: Karta Ni USB 6210</i>	46
<i>Obr. 36: Frekvenční měnič [15]</i>	47
<i>Obr. 37: Schéma zapojení frekvenčního měniče</i>	48
<i>Obr. 38: Zapojení dynamometru a periférií</i>	49
<i>Obr. 39: Grafická závislost výkonu a momentu na otáčkách</i>	51

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Mezní spády pro turbíny daných otáček</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2: Parametry čerpadla Elpumps CT4274</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3: Parametry Bánkiho turbíny pro malou vodní elektrárnu</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4: Plochy jednotlivých profilů.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 5: Parametry alternátoru</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6: Měřené veličiny.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 7: Vlastnosti frekvenčního měniče [15]</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 8: Možnosti frekvenčního měniče a značení svorek [15].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9: Mechanické ztráty turbíny</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 10: Naměřené a dopočtené hodnoty.....</i>	<i>50</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam	Jednotka
P	Výkon	W
H	Spád	m
Q	Průtok	l.s^{-1}
D	Vnější průměr vodního kola	mm
D_2	Vnitřní průměr vodního kola	mm
L	Délka štěrbiny	mm
L_2	Délka lopatky	mm
k_{ods}	Koeficient ostříku	-
k_{LD}	Koeficient mechanické pevnosti	-
d_H	Průměr hřídele	mm
c	Rychlost vody na lopatky	m.sec^{-1}
s	Otevření štěrbiny	mm
n	Otáčky turbíny	ot.min^{-1}
n_o	Otáčky naprázdno	ot.min^{-1}
P_t	Výkon turbíny	W
AC	Střídavé napětí	V
DC	Stejnoseměrné napětí	V
PE	Polyetylen	-
DN	Světlost potrubí	mm
$Q_{poč}$	Zbývající průtok	ot.min^{-1}
Q_t	Počáteční průtok	ot.min^{-1}
φ_{omax}	Úhel obchvatu	°
φ_n	Úhel spirály	°
S_n	Plocha profilu	m^2
$S_{poč}$	Vstupní plocha	m^2
ρ_n	Přírůstek kružnice	m
R_n	Poloměr kružnice	m
S_3	Vstupní plocha	m^2
S_4	Výstupní plocha	m^2
l_s	Délka sací trouby	m
D_{ok}	Průměr oběžného kola	m

1 ÚVOD

V posledních letech se rozmohlo získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Mezi zástupce, kteří se na výrobě této energie podílí, můžeme uvést např. větrné, fotovoltaické, geotermální, vodní a další elektrárny. Z těchto zdrojů lze získávat tzv. „čistá energie“. Protože v české republice je několik významných vodních elektráren, jako např. Dalešice, Slapy, Dlouhé stráně a další, vznikla tato semestrální práce k vyrobení modelu malé vodní elektrárny, která bude sloužit pro výukové účely, a měla by ukázat studentům, jak v praxi taková malá vodní elektrárna vyrábí elektrickou energii pomocí využití energie vodního toku.

Součástí této semestrální práce je vytvořit plně funkční model malé vodní elektrárny od turbíny až po návrh konstrukce pro umístění všech potřebných prvků pro bezproblémový chod modelu. Nutno podotknout, že tato vodní elektrárna bude fungovat v ostrovním režimu. Posledním bodem by mělo být zařazení tohoto modelu pro laboratorní úlohy a možnost studentům si tento model vlastnoručně vyzkoušet.

2 VODNÍ ENERGIE

Vodní energie je v historii lidstva nejdéle technicky využívanou formou energie, která se nachází v přírodě. Využívání této energie je neoddelitelně spjata s vývojem civilizace. O vodní energii lze říci, že je zdrojem relativně dostupným, čistým a hlavně obnovitelným. Voda se v přírodě používá jako nositel energie chemické, tepelné a mechanické.

Z technického hlediska využití je nevýznamnější energie vodních toků. Nejvíce se využívá forma potenciální (polohová a tlaková) a okrajově i kinetická. Energii vodních toků lze využívat již zvládnutým strojově-technologickým zařízením, které dosahuje poměrně vysoké technicko-ekonomické úrovně. V současnosti se tyto zařízení používají většinou ve vodních elektrárnách. Podstatnou částí každého vodního díla je vodní motor nebo také turbína. U tohoto stroje dochází k přeměně (transformaci) energie vodního toku na energii mechanickou.

V našich podmínkách využití vodní energie je pouze doplňkovým, ale velmi cenným zdrojem energie. Od roku 1950 byla vodní energie využívána k výrobě elektrické energie a to zejména ve velkých vodních dílech, které měly celospolečenský význam. V letech 1949 – 1963 byly vybudovány nejvýznamnější hydroenergetická díla na Vltavské kaskádě (Slapy, Orlik, Lipno). Nepřehlédnutelným znakem větších hydroenergetických děl jsou údolní přehrady, které kromě soustředění spádu a akumulace vody pro provoz turbín plní další funkce. Akumulační schopnosti těchto děl lze využít pro ochranu před povodněmi a regulaci průtoku v řečišti pod přehradou. Stavba přehradní hráze s následně vzniklou vodní plochou je zásahem do původního přírodního prostředí. Vždy by se mělo jednat o citlivý zásah, respektující širší souvislosti nejen z technického a ekonomického hlediska, ale také ekologického, demografického a sociálního [3].

2.1 Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny lze třídit dle různých hledisek, která se vzájemně prolínají. Například podle **velikosti instalovaného výkonu**:

- Velké vodní elektrárny - instalovaný výkon nad 200 MW
- Střední vodní elektrárny - instalovaný výkon od 10 MW do 200 MW
- Malé vodní elektrárny - instalovaný výkon do 10 MW.

Elektrárny s instalovaným výkonem nad 100 MW bývají někdy také zařazovány do velkých vodních elektráren.

Další dělení je podle **velikosti využívaného spádu**:

- Nízkotlaké - využívají spád do 20 m
- Středotlaké - využívají spád nad 20 m do 100m
- Vysokotlaké - využívají spád nad 100 m.

Toto rozdělení je významné z hlediska použití vhodného typu vodní turbíny (motoru).

Dělení dle **charakteru pracovního režimu** (způsob provozu):

- Průtočné – nedochází k výraznému ovlivňování přirozeného průtoku toku, nemají akumulaci nádrží
- Akumulační (špičkové) – zde dochází k řízení odběru vody z akumulaci nádrže vytvářející vhodný spád. Do této kategorie lze také zařadit elektrárny přečerpávací [1].

3 POTŘEBNÉ PARAMETRY PRO MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Pro představu o velikosti daného hydroenergetického zdroje pro daný projekt musíme nejdříve získat potřebné podklady vyplývajícího z obecného vztahu pro výkon hydroenergetického zdroje

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad (3.1.)$$

kde P je výkon hydroenergetického zdroje (W), Q je průtok vodním strojem ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), H čistý spád (m) a η_c představuje celkovou účinnost zařízení.

Z této rovnice je patrné, že pro určení navrhovaného výkonu je třeba stanovit návrhový průtok, čistý spád a znát účinnost a samozřejmě další vlastnosti vodního stroje, který pro daný projekt připadá v úvahu. Zároveň jsou ve zmíněném vztahu zakódovány také základní principy využití vodní energie, tj. soustředování průtoků a spádu při existenci vhodného vodního stroje s nenulovou účinností [3].

3.1 Energie vodního toku

Nositelkou energie je pracovní kapalina, kterou je u vodních turbín voda. Vodní energii lze rozdělit na dvě modifikace [1][8]:

- Potenciální energie – polohová a tlaková
- Kinetická energie (rychlostní, pohybová)

Při proudění kapaliny existují ve všech bodech proudu obě formy současně a jsou na sebe vázány. Mírou energetického obsahu kapaliny je její energie, kterou lze definovat jako energii vztaženou na jednotku pracovní kapaliny. Obecně lze říci, že celková energie v libovolném průtočném průřezu při uvažování stálého proudění je určena součtem polohové energie, tlakové energie a kinetické energie

$$E_c = E_p + E_h + E_k \quad (3.2.)$$

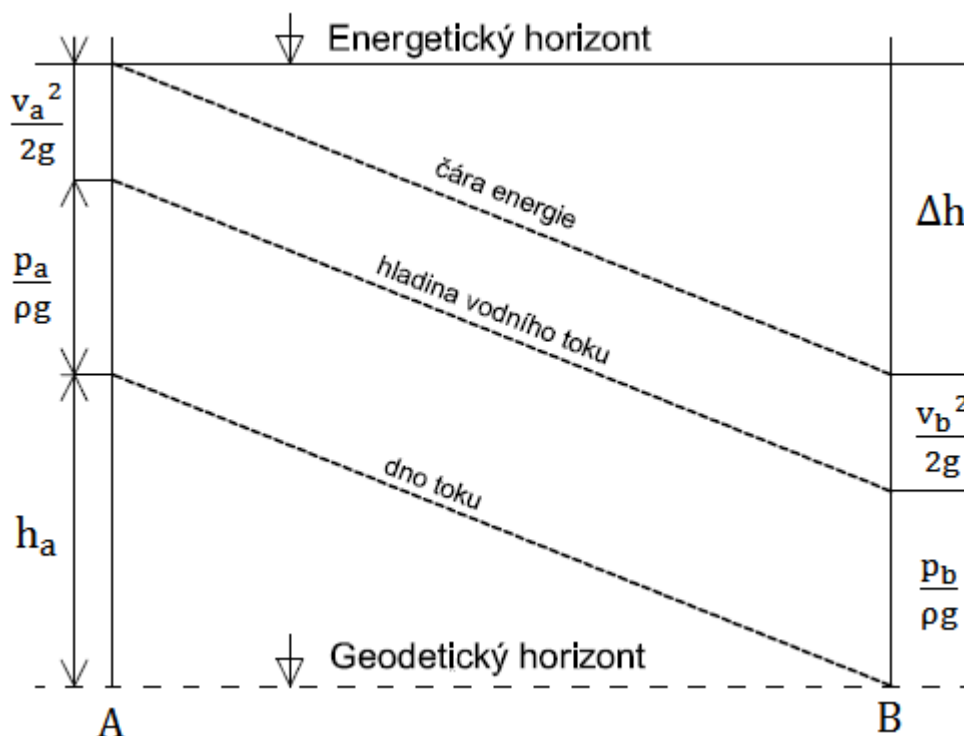
kde E_p je tlaková energie (J), E_h polohová energie (J), E_k kinetická energie (J) a E_c celková energie (J). Pro tyto energie platí následující vztahy

$$E_p = m \cdot \frac{p}{\rho} \quad (3.3.)$$

$$E_h = m \cdot g \cdot h \quad (3.4.)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.5.)$$

kde p je absolutní statický tlak v kapalině (Pa), ρ měrná hmotnost kapaliny ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), g zemské tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), h statická výška hladiny ke zvolenému geodetickému bodu (m), v střední rychlost proudění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Energie díla představuje maximální hodnotu celkové měrné energie kapaliny dílem využitě. Je dán rozdílem celkových měrných energií kapaliny horní a dolní nádrže viz Obr. 1.



Obr. 1: Tlakový spád vodního toku

Pokud budeme uvažovat Bernoulliho rovnici, můžeme napsat výslednou energii vodního toku mezi body A-B ve tvaru

$$E_a = \left(h_a + \frac{p_a}{\rho \cdot g} + \frac{v_a^2}{2 \cdot g} \right) \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot t \quad (3.6.)$$

Každou část rovnice můžeme pojmenovat dle toho, co představují – h_a je statická výška hladiny vzhledem ke zvolenému geodetickému horizontu, $\frac{p_a}{\rho \cdot g}$ představuje tlakovou výšku, $\frac{v_a^2}{2 \cdot g}$ představuje rychlostní výšku a E_a je energie vodního toku v bodě a (J). Obdobně můžeme také napsat rovnici pro bod B

$$E_b = \left(\frac{p_b}{\rho \cdot g} + \frac{v_b^2}{2 \cdot g} \right) \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot t \quad (3.7.)$$

Rozdílu energií mezi oběma body dosáhneme vztahu

$$E_a - E_b = \left[h_a + \frac{p_a - p_b}{\rho \cdot g} + \frac{v_a^2 - v_b^2}{2 \cdot g} \right] \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot t \quad (3.8.)$$

Každý člen v závorce značí změnu pro jednotlivé druhy energie a tyto změny můžeme popsat takto

$$h_a \equiv \Delta h_b \text{ (změna energie polohové)}$$

$$\frac{p_a - p_b}{\rho \cdot g} \equiv \Delta h_p \text{ (změna energie tlakové)}$$

$$\frac{v_a^2 - v_b^2}{2 \cdot g} \equiv \Delta h_v \text{ (změna energie kinetické)}$$

Jednotlivé výšky lze sečíst a vznikne tento vztah

$$H = \Delta h_b + \Delta h_p + \Delta h_v \quad (3.9.)$$

Nyní můžeme napsat vztah, který bude platit pro energii vodního toku, mezi body A-B ve tvaru

$$E = H \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot t \quad (3.10.)$$

3.2 Základních parametry

Pracovní proces každého vodního stroje a každé vodní turbíny je určován jejich základními pracovními parametry, které charakterizují jak vnitřní hydraulické jevy, tak proces přeměny mechanické energie vody na mechanickou energii rotujícího hřídele. Základní parametry jsou spád H (m), průtok Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), výkon hřídele P (W), otáčky n (min^{-1}) a posledním parametrem je účinnost η . Kromě těchto uvedených parametrů je turbína charakterizována také konstrukčními parametry. Dále podrobně objasníme význam a obsah jednotlivých základních parametrů. Jejich správné a přesné pochopení je základním předpokladem pro vhodný návrh hydroenergetického díla i každé malé vodní elektrárny.

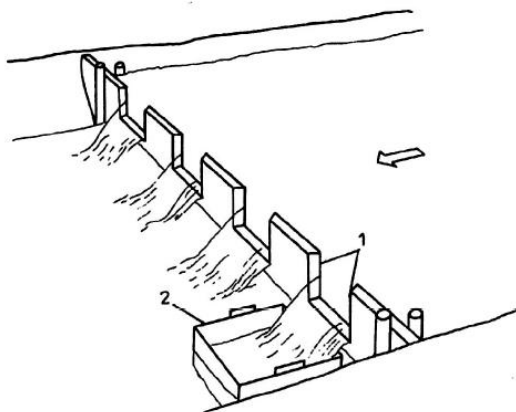
3.2.1 Průtok turbínou

Hlavním kritériem, které se při volbě navrhovaného průtoku uplatňuje, je snaha o co nejvyšší roční výrobu energie při minimálních investičních a provozních nákladech malé vodní elektrárny. V našich podmínkách je třeba přizpůsobit volbu navrhovaného průtoku i hltlostem turbín nabízených pro daný spád. Můžeme očekávat, že výsledný navrhovaný průtok může mít několik průtokově dosti odlišných variant dané provozními vlastnostmi strojů.

Průtok lze jednoduše vypočítat podle vztahu

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.11.)$$

kde V je objem kapaliny (m^3) a t je čas (s). Abychom mohli získat přesné hodnoty průtoku, lze využít tzv. Objemové měření průtoku, které je jednou z nejpřesnějších metod, je však vhodné ji používat jen pro měření menších průtoků. Na Obr. 2 je vidět, jak provést takové měření. Do posuzovaného místa vložíme těleso pro přehrazení vodního toku, ve kterém jsou připraveny obdélníkové otvory, které slouží k protékání vody. Pod tento obdélník vložíme nádobu, která má určitý objem a měříme čas, kdy dojde k naplnění této nádoby. Poté zastavíme časomíru a díky těmto hodnotám můžeme vypočítat průtok pro jeden otvor. Abychom získali celkový průtok, je nutné průtok pro jeden otvor vynásobit počtem otvorů, které se nachází v objektu. Průtok vyjadřuje objem vody, který proteče daným profilem vodního toku za jednotku času.



Obr. 2: Objemové měření průtoku (1–parciální obdélníkový ostrohranný měrný přeliv, 2–měrná nádoba kalibrovaná)

3.2.2 Spád turbíny

Zásadně lze rozlišit dva druhy spádu, a to spád celkový H_b (brutto) a spád čistý H (netto). Snahou každého projektanta je získat co největší soustředění spádu turbíny, tj. nejvyšší hodnota celkového i čistého spádu. Technicky to lze provést pomocí výstavby např. přehrady nebo převedením průtoku vody derivací. Celkový spád turbíny lze jednoduše definovat jako rozdíl horní hladiny a hladiny bezprostředně pod vodním dílem. Toto určení je nenáročné stačí k tomu například nivelační přístroj.

3.2.3 Výkon turbíny

Vztah pro výkon turbíny P_t je analogický vztahem uvedeným v rovnici (3.1) pro výkon hydroenergetického zdroje P . Výkon lze vyjádřit ve vztahu

$$P_t = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (3.12.)$$

Kde P_t je výkon na hřídeli turbíny (W), Q představuje průtok turbínou ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), H udává čistý spád turbíny (m) a η_t značí účinnost turbíny, která se u turbín pro malé vodní elektrárny může pohybovat v relativně širokém rozmezí $\eta_t = 0,6-0,9$, přitom oblast nejvyšších účinností je $\eta_t = 0,9$ a je vyhrazena především pro Kaplanovy turbíny vyšších výkonů a rozměrů s průměrem oběžného kola nad 2 m, zatímco u turbín Kaplanových, vrtulových a Bánkiho typu s průměrem oběžného kola nad 0,5 m lze očekávat účinnost $\eta_t = 0,8-0,85$. U nejmenších vyráběných turbín vrtulových a Bánkiho typu činí účinnost přibližně $\eta_t = 0,7$.

3.2.4 Otáčky turbíny a soustrojí

Provozní otáčky vodních turbín, při nichž je zajištěna vysoká účinnost energetických přeměn, se dle jednotlivých turbín a jejich parametrů pohybují v širokém rozmezí od 53 do 1500 min^{-1} . Nízké otáčky jsou nevýhodné z toho důvodu, že vyžadují náročné převody do rychla (s ohledem na elektrické stroje). Vysoké provozní otáčky jsou zase zdrojem nebezpečí při výpadku generátoru, kdy se turbína rozbíhá na několikanásobně vyšší, tzv. průběžné otáčky. Určení vhodných provozních jmenovitých otáček turbíny je relativně náročné a neobejde se bez spolupráce s výrobcem. Přitom jde o rozhodnutí velmi zodpovědné a z hlediska provozu závažné, uvážíme-li, že je turbína spojena přímo nebo prostřednictvím převodu s generátorem, jehož provoz vyžaduje konstantní otáčky. Z provozních důvodů se jako ochrana před kavitací turbín nedoporučuje pro jednotlivé turbíny charakterizované určitými otáčkami (n) volit vyšší spády, než udává Tab. 1.

n (min^{-1})	70	110	150	200	300	400	500	600	700	800
H_{max} (m)	260	181	111	75	41	26	17	13	10	8

Tab. 1: Mezní spády pro turbíny daných otáček

3.2.5 Účinnost turbíny

Účinností turbíny rozumíme poměr skutečného užitého výkonu naměřeného na jejím hřídeli k teoretickému bezztrátovému výkonu vodního proudu, který přichází k turbíně. Jde tedy o účinnost přeměny mechanické energie vody na mechanickou energii rotujícího hřídele turbíny. Uvážíme-li, že vodní turbína je z hlediska účinností nejdokonalější mechanický motor vůbec, lze očekávat vysoké účinnosti u všech používaných typu turbín. U turbín malých vodních elektráren a mikro zdrojů se tyto účinnosti pohybují přibližně v rozmezí

$$\eta_t = 0,75 - 0,9$$

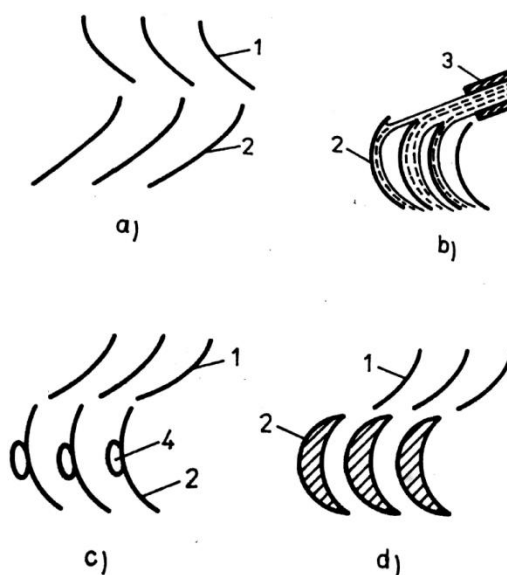
Hodnoty nejvyšších účinností i průběhu hodnot účinnosti v závislosti na měnícím se spádu a průtoku jsou závislé na řadě okolností a faktorů. Z nich lze jmenovat především typ a absolutní rozměry turbíny, kvalitu výroby a velikost výkonů. Lze říci, že čím je turbína konstruována na větší výkon, tím má zpravidla větší rozměry, je relativně lépe opracovaná s hladšími povrchy a velká péče je věnována konstrukci mazání ložisek [1][3].

4 TURBÍNY

4.1 Klasifikace vodních turbín

Hydroenergetika vyžaduje použití vodních turbín různých typů, výkonů, rozměrů a konstrukčního řešení. Volba vhodného typu a provedení je dána především konkrétní konfigurací terénu a hydrologickými podmínkami v místě instalace vodní turbíny. Existuje poměrně mnoho typů turbín používaných v různých variantách konstrukčního řešení a projekčního uspořádání. Podrobná terminologie a přesná klasifikace a začlenění stroje je specifikováno příslušnými normami. Zde se omezíme pouze na základní třídění. Vedle již zmíněného členění podle způsobu přenosu energie na oběžné kolo se turbíny označují podle průtoku vody oběžným kolem. Oběžné kolo je vlastní pracovní částí turbíny. V rotující kruhové lopatkové mříži dochází k procesu přeměny hydraulické energie vody v mechanickou energii rotující lopatkové mříže.

U přetlakových (reakčních) turbín je část tlakové měrné energie v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu přeměněna na kinetickou měrnou energii a zbývající část tlakové měrné energie se mění v měrnou energii kinetickou při průchodu vody oběžným kolem. Toto označení vyplývá z toho, že se průtok oběžným kolem uskutečňuje, jak je zřejmé dle Obr. 3a, působením přetlaku na vstup do oběžného kola. Pokud se celá hodnota tlakové měrné energie mění v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu v kinetickou měrnou energii, potom je na vstupu a výstupu oběžného kola stejný tlak Obr. 3b, c. Jde tedy o turbínu rovnotlakou. Proud vody nevyplňuje plně průtočné kanály oběžného kola, které musí mít okolí zaplněno vzdušinou. Je-li tlak vzdušiny rovný tlaku atmosférickému, pak nemohou mít tyto turbíny umístěno oběžné kolo pod spodní hladinou vody, neboť voda by vnikala do částečně zaplněných průtočných kanálů, narušovala by charakter proudění a zhoršovala účinnost[1][6].

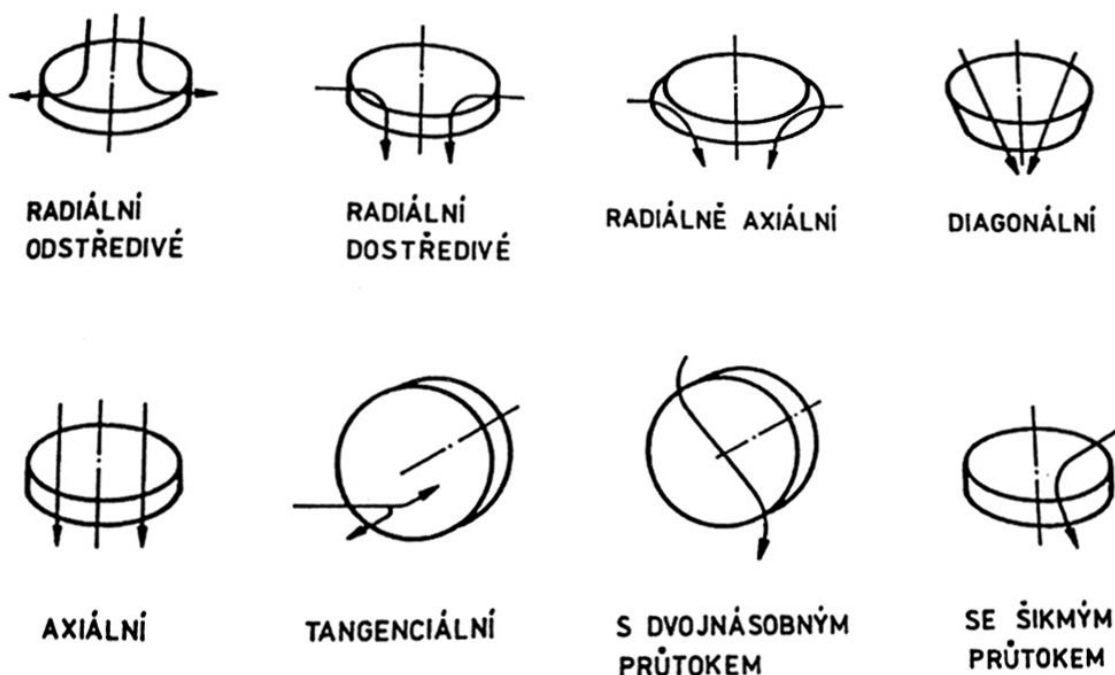


Obr. 3: Členění turbín dle způsobu přenosu energie (1-rozváděč, 2-oběžné kolo, 3-dýza, 4-zavzdušňovací otvory)

4.2 Rozdělení turbín podle průtoku vody oběžným kolem

Podle projekčního a konstrukčního řešení se rozlišuje horizontální, vertikální nebo šikmé uspořádání soustrojí vodní turbíny. Varianty řešení jsou znásobeny možnostmi uspořádání zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu a pro odvod vody od oběžného kola. Určujícím prvkem, nezávislým na variantě řešení, je oběžné kolo se svou typickou orientací proudění. Rozdělení vodních turbín podle orientace proudění vzhledem k ose oběžného kola je uvedeno na Obr. 4, v němž značí [1][6]:

- **Radiální odstředivá turbína** – s vnitřním vtokem vody, přičemž voda protéká oběžným kolem směrem od hřídele (Fourneyronova)
- **Radiální dostředivá turbína** – s vnějším tokem vody, přičemž voda protéká oběžným kolem směrem k hřídeli (historická turbína Francisova)
- **Radiálně axiální turbína** – voda proudí oběžným kolem nejprve radiálně a po přiblížení k ose se mění směr proudění na přibližně osový (moderní Francisova turbína)
- **Diagonální turbína** – voda protéká oběžným kolem v šikmém směru k ose hřídele (Dériazova turbína)
- **Axiální turbína** – voda protéká oběžným kolem ve stálé vzdálenosti od osy oběžného kola (Jonvalova turbína, Kaplanova turbína)
- **Tangenciální turbína** – voda vstupuje na lopatky oběžného kola v tangenciálním směru (Peltonova turbína)
- **Turbína s dvojnásobným průtokem** – voda vstupuje do oběžného kola centripetálně a vystupuje centrifugálně (Bánkiho turbína)
- **Turbína se šikmým průtokem** – voda vstupuje na lopatky oběžného kola z boční strany a vystupuje v osovém směru (Turgo turbína)



Obr. 4: Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem

4.3 Francisova turbína

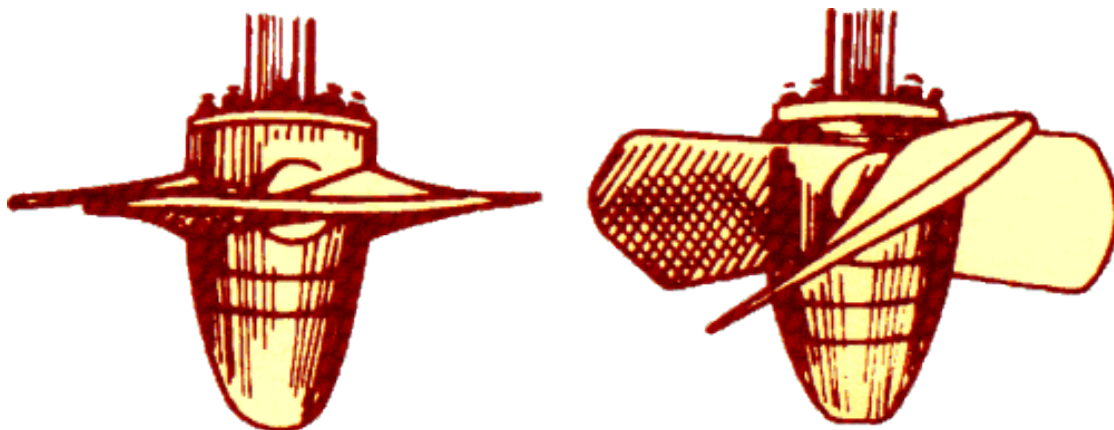
Přetlaková, radiálně axiální. Oběžné kolo je opatřeno pevnými oběžnými lopatkami spojenými s věncem a nábojem kola. Regulačním orgánem je rozváděč s natáčivými rozváděcími lopatkami, které jsou ovládány regulačním mechanismem. Obvyklé provedení turbíny je vertikální nebo horizontální se spirálou a sací troubou. Francisova turbína je v minulosti nejrozšířenější typ přetlakové turbíny využívané u malých vodních elektráren. Charakteristickým prvkem je oběžné kolo. Rozváděcí lopatky nasměrují proud vody na lopatky oběžného kola. Na nich mění voda svůj směr, kde dochází k předávání potenciální a kinetické energie. Použití Francisovy turbíny je široké. Používají se pro střední i vysoké spády. Vyrábí se pro výkony od jednotek až po stovky MW [1][6].



Obr. 5: Francisova turbína [4]

4.4 Kaplanova turbína

Přetlaková, axiální. Oběžné kolo bez vnějšího věnce má oběžné lopatky upevněny natáčivě v náboji kola. Náboj má vhodný (zjednodušeně válcový s částí kulové plochy) tvar. Lopatky jsou ovládané regulačním mechanismem osazeným uvnitř kola. Osa čepů lopatek svírá s osou náboje úhel 90° . U standartních provedení se jejich plynulé natáčení provádí za provozu stroje. Rozváděč, který může být řešen jako radiální, diagonální až téměř axiální, má rovněž natáčivé lopatky ovládané vlastním regulačním mechanismem. Změna polohy oběžných a rozváděcích lopatek je prováděna současně, nebo vázaně. Obvyklé provedení turbíny je vertikální, případně horizontální se spirálou. Moderním řešením je přímotoká axiální turbína malých i velkých výkonů. Výraznou předností Kaplanovy turbíny je dvojitá regulace, tj. aplikace regulovatelného rozváděče i oběžného kola, což vede ke zvýšení hodnoty účinnosti. Možnosti nastavení optimální vzájemné vazby otevření oběžného kola a rozváděče zaručuje příznivé průtokové poměry v oběžném kole nejen z hlediska energetického, ale i z hlediska snížení tlakových pulsací na výstupu z oběžného kola k zlepšení dynamického chování turbíny. Nevýhodou Kaplanovy turbíny je relativně vysoká hodnota kavitačního součinitele. Vzhledem ke kavitačním vlastnostem je často opodstatněné použít oběžných lopatek ze speciálních korozivzdorných materiálů odolných proti kavitačnímu poškození. Tuto turbínu si lze prohlédnout na Obr. 66 [1][6].



Obr. 6: Kaplanova turbína [5]

4.5 Peltonova turbína

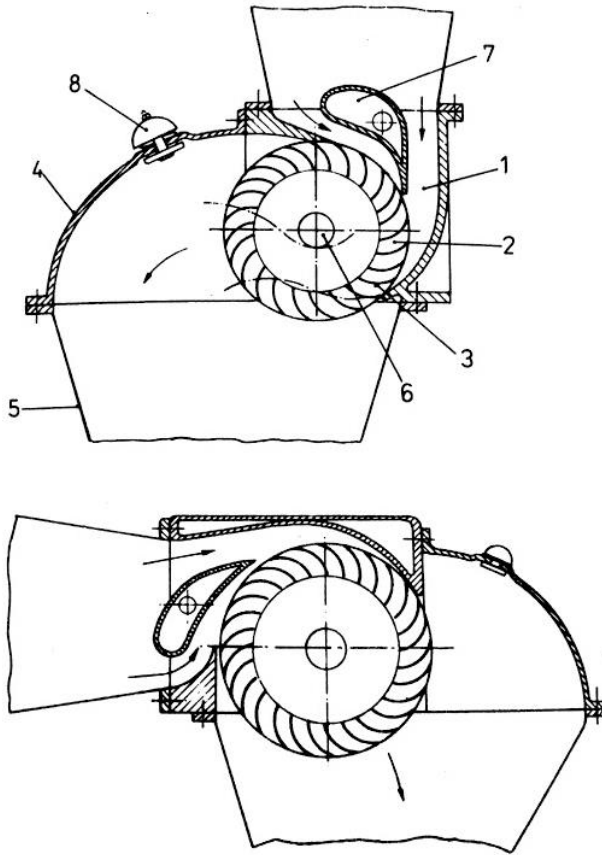
Rovnotlaká, tangenciální. Oběžné lopatky ve tvaru dvojitého korečku jsou pevné (neregulační). Rozváděcí ústrojí tvoří 1 až 6 dýz, ze kterých vystupuje voda ve formě paprsku kruhového průřezu. Paprsek ostříkává na roztečném průměru oběžné lopatky. Regulace výkonu se provádí pomocí průtoku zavíráním nebo otevíráním výtokového otvoru dýzy přímočarým pohybem jehly. K rychlému odstavení z provozu se používá zařízení na odklánění nebo odřezávání vodního paprsku, tzv. deviátor nebo deflektor. Uspořádání tohoto soustrojí bývá horizontální, při více

jak dvou dýzách bývá vertikální. Peltonova turbína je nejpoužívanějším typem rovnotlaké turbíny uplatňující se při realizaci malých vodních elektráren. Velkou výhodou je, že tato turbína dokáže pracovat s velmi velkými spády[1][6].



Obr. 7: Peltonova turbína [5]

4.6 Bánkiho turbína



Obr. 8: Bánkiho turbína

5. Oběžné kolo je uloženo na horizontální hřídeli 6, i když i vertikální provedení je teoretický možné. Regulace průtoku se provádí zpravidla klapkou 7 ve vstupním tělese. Těleso turbíny může být také vybaveno zavzdušňovacím ventilem 8. Z uvedeného popisu vyplývá, že voda protéká oběžným kolem tvořeným kruhovými deskami, mezi něž jsou po obvodu upevněny oběžné lopatky. Přestože řadíme tuto turbínu mezi rovnotlaké, je rovnotlakým pouze druhý průtok oběžným kolem. První průtok lze uvažovat za přetlakový, neboť následkem minimální vzdálenosti výstupní hrany vstupního tělesa od vstupní hrany lopatek oběžného kola má voda na vstupu do oběžného kola určitou minimální hodnotu měrné tlakové energie, která je při prvním průtoku využita. Pro teoretické řešení se však předpokládá, že i první průtok je rovnotlaký[1][6].

Bánkiho turbína, dříve také známá jako Mitchellova turbína, byla vynalezena kolem roku 1900. Původní návrh převzal roku 1916 Donát Bánki, který vysvětlil teorii provozu a od této doby je známa pod tímto názvem. Je specifickým typem rovnotlakých turbín s tangenciálním ostřikem a horizontálním hřídelem. Je to turbína s dvojnásobným průtokem kapaliny oběžným kolem. Oběžné kolo má lopatky vytvořené z kruhově prohnutých desek, osazených mezi paralelní kotouče. Vstup vody do oběžného kola je dostředivý a výstup z oběžného kola je odstředivý. Uspořádání této turbíny je horizontální. Turbína bývá v provedení s odpadní šachtou nebo sací troubou. Bánkiho turbína pracuje tak, že voda je vstupním tělesem 1 přiváděna k části vnějšího obvodu oběžného kola 2, jehož lopatkovou mříž 3 protéká do prostoru uvnitř oběžného, odtud přes lopatkovou mříž do tělesa turbíny 4 spojeného s odpadní šachtou nebo savkou

5 NÁVRH KONSTRUKCE

Nejdůležitějším prvkem při návrhu vodní elektrárny je vybrat vhodný typ turbíny, která bude použita pro pohon generátoru. Pro vhodný výběr bylo nutno stanovit základní parametry, které budeme od příslušné turbíny požadovat. Po domluvě s vedoucím práce bylo zapotřebí splnit tyto požadavky:

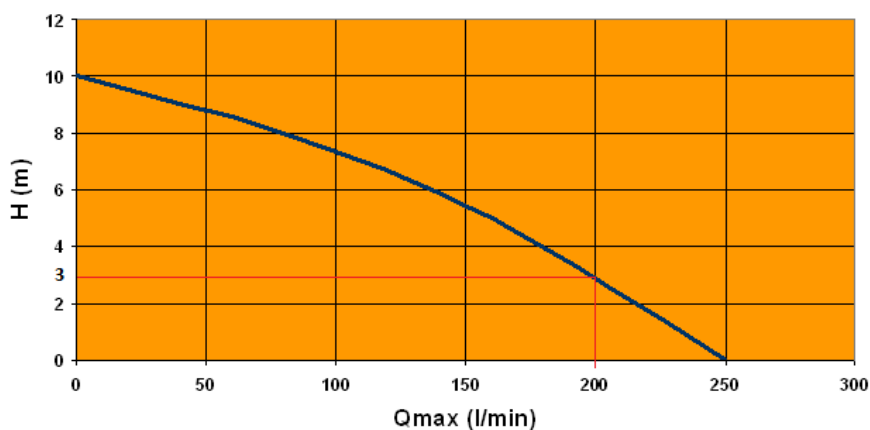
- Výkon turbíny na hřídeli přibližně 60 W
- Otáčky turbíny nad 1000 min⁻¹

Po stanovení těchto parametrů přicházely v úvahu tyto dva typy turbín – Bánkiho nebo Peltonova. Pro naše účely byla vybrána Bánkiho turbína, která je konstrukčně jednodušší. Jediným nedostatkem této turbíny bude její velikost pro požadovaný výkon oproti Peltonově turbíně. Největší přednost této turbíny spočívá v tom, že spojení mezi generátorem a turbínou bude možno provést bez pomoci převodovky a nedojde k poklesu účinnosti celkového modelu.

5.1 Čerpadlo

Prvním krokem bylo nutno zvolit vhodný průtok Q a spád H , při kterém bude turbína pracovat. Správně zvolenými hodnotami dosáhneme požadovaného výkonu na turbíně. Tyto hodnoty souvisí s parametry čerpadla. V úvahu bylo vybráno několik druhů čerpadel od různých společností. Pro tento model bylo zvoleno čerpadlo Elpumps CT 4274 viz Obr. 10, které splnilo potřebné požadavky pro správný chod turbíny. Čerpadlo bude pracovat v pracovním bodě, který je vyznačen v charakteristice čerpadla viz Obr. 9, pomocí červené barvy. Hodnoty odečtené od tohoto pracovního bodu jsou spád $H = 3$ m a průtok, který by při tomto spádu měl odpovídat přibližně $Q = 3,3$ l.s⁻¹.

U tohoto čerpadla bude však muset dojít k modifikaci, aby nedocházelo k samovolnému vypínání či zapínání. V úvahu přicházejí dvě možnosti. První možnost je připevnění plováku, který slouží jako vypínač čerpadla do polohy, kdy nedojde k samovolnému vypnutí. Druhou z možností je odstranění tohoto plováku a nahrazení vypínačem, který by plnil stejnou funkci. Čerpadlo bude připojeno pomocí kabelu HO5RNF 3x0,75mm do sítě. Jednotlivé parametry čerpadla lze nalézt v Tab. 2 a vzhled tohoto čerpadla na Obr. 10.



Obr. 9: Charakteristika čerpadla Elpumps CT 4274[9]



Obr. 10: Čerpadlo Elpumps CT 4274

Parametry čerpadla	
Jmenovitý příkon	800 W
Napětí	230 V
Frekvence	50 Hz
Max. čerpací výkon	15000 l/hod
Maximální výška	10 m
Maximální průměr pevných příměsí	35 mm
Maximální tlak	1 bar
Průměr potrubí 5/4"	5/4 (32 mm)
Kabeláž HO5RNF	3 x 0,75 mm
Délka kabelu	10 m
Max. teplota média	35 °C
Velikost balení	210 x 170 x 360 mm
Hmotnost	4,5 kg

Tab. 2: Parametry čerpadla Elpumps CT4274

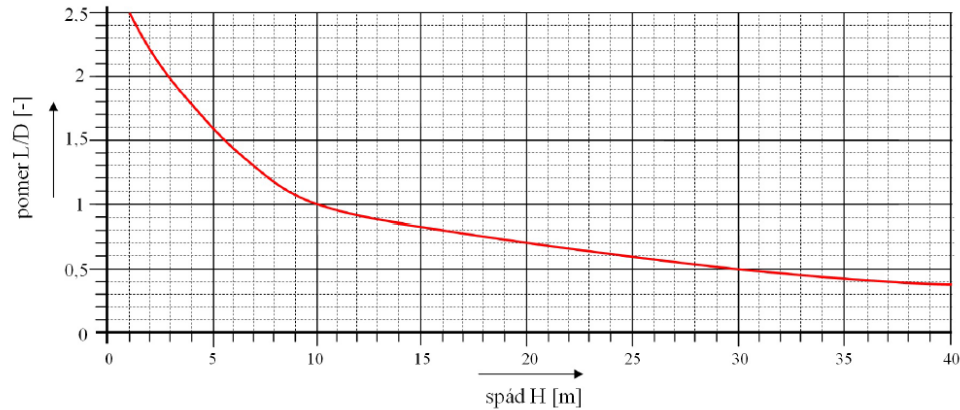
5.2 Návrh Bánkiho turbíny

Pro ověření, zda došlo ke splnění požadovaného výkonu, využijí vzorec 3.12. Účinnost tohoto typu turbíny se pohybuje okolo 0,75-0,9. Pro tento model se účinnost turbíny bude uvažovat $\eta_t = 0,6$. Tato hodnota byla zvolena, protože se výrobou turbíny nebudou zabývat odborníci, kteří mají se stavbou turbín zkušenosti. Konečná účinnost turbíny však může dosahovat lepší hodnoty než při teoretickém výpočtu. To v důsledku znamená, že dojde k zvýšení výkonu při konstantním spádu a průtoku, který bude turbína dodávat.

$$P_t = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t = 9,81 \cdot 3,3 \cdot 3 \cdot 0,6 = 58 \text{ W} \quad (5.1.)$$

Po kontrolním výpočtu vychází výkon turbíny P_t na hodnotu 58W. Původní požadavek, aby turbína dosahovala cca 60 W, je splněn a mohu pokračovat v návrhu Bánkiho turbíny.

Součástí parametrů, které je nutno zjistit, je tzv. koeficient poměru délky turbíny k průměru oběžného kola k_{Id} a další parametr je koeficient ostříku $k_{ostř}$. Koeficient ostříku se v dnešní době pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,3. V dostupných knižních publikacích se doporučuje použít koeficient s hodnotou $k_{ostř} = 0,2$ [3][7]. Koeficient k_{Id} představuje mechanickou pevnost turbíny, která závisí na délce a průměru oběžného kola. Podle Obr. 11 by tento koeficient měl odpovídat hodnotě 1,9. Pokud by však byla tato hodnota koeficientu použita při návrhu, tak by turbína dosahovala velmi malých rozměrů. Toto by nebylo vhodné, pokud se má tento model vodní elektrárny prezentovat studentům. Proto byl pro náš návrh použit koeficient dle konzultace s vyučujícím. Tento koeficient byl zvolen takto, protože turbína bude dosahovat pouze desítek wattů a není nutná taková mechanická pevnost turbíny. Koeficient pro naši navrhovanou turbínu byl zvolen $k_{Id} = 0,5$.



Obr. 11: Charakteristika L/D závislá na spádu [7]

Pokud známe, tyto hodnoty můžeme přistoupit k výpočtu potřebných parametrů Bánkiho turbíny [3][7]. Ze zvoleného spádu můžeme vypočítat vstupní rychlost vody c_1 dle

$$c_1 = 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{19,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 3 \text{ m}} = 7,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.2.)$$

Díky získání hodnoty rychlosti vody a odečteného průtoku pomocí charakteristiky čerpadla, která byla součástí technické listu, můžeme následně určit plochu nátoky, která bude nutná pro splnění požadovaných parametrů turbíny

$$a = \frac{Q}{c_1} = \frac{0,0033 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{7,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 4,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5.3.)$$

Za použití koeficientu k_{1d} a koeficientu $k_{ostř}$ a již dříve vypočítané plochy nátoky, můžeme spočítat tzv. největší otevření štěrbin s . Při tomto otevření bude turbína dodávat největší možný výkon, toto otevření lze vypočítat dle

$$s = 1000 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot k_{ostř}}{k_{1d}}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0,2}{0,5}} = 13,25 \text{ mm} \quad (5.4.)$$

Po získání předešlých hodnot jednotlivých parametrů mohou nyní bez sebemenších problémů vypočítat rozměr turbíny. Konkrétně se bude se jednat o vnější průměr oběžného kola D pomocí vzorce

$$D = \frac{s}{k_{ostř}} = \frac{13,25 \text{ mm}}{0,2} \doteq 67 \text{ mm} \quad (5.5.)$$

Po určení vnějšího průměru kola D jsem schopen přistoupit k výpočtu vnitřního průměru kola turbíny D_2 pomocí vzorce

$$D_2 = 0,66 \cdot D = 0,66 \cdot 67 \text{ mm} \doteq 44 \text{ mm} \quad (5.6.)$$

Nyní jsem získal hodnotu průměru pro vnější a vnitřní oběžné kolo. Dalším krokem je vypočítat délku štěrbiny L , kterou lze vypočítat dle vztahu

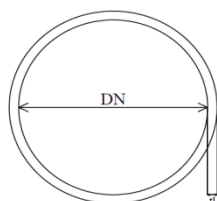
$$L = D \cdot k_{1d} = 66,3 \text{ mm} \cdot 0,5 \doteq 33 \text{ mm} \quad (5.7.)$$

Z hodnoty L mohu nyní spočítat délku lopatek, ke které se musí přičíst hodnota (5-15 mm), která slouží k zabezpečení, aby voda dopadala bezprostředně na lopatky turbíny a nedocházelo k zbytečným ztrátám v důsledku úniku vody mimo lopatky turbíny. Délka lopatek L_2 se vypočítá pomocí vzorce

$$L_2 = L + 15 \text{ mm} = 33,15 \text{ mm} + 15 \text{ mm} \doteq 48 \text{ mm} \quad (5.8.)$$

Pomocí předchozího vzorce jsem získal rozměr délky lopatky. Nyní už chybí pouze spočítat světlost trubky, která bude použita pro výrobu daných lopatek. Pro správné pochopení výpočtu světlosti byl výpočet doplněn Obr. 12 a tato světlost se vypočte dle vztahu

$$DN = 0,326 \cdot D - 2 \cdot tl = 0,326 \cdot 66,3 \text{ mm} - 2 \cdot 1 \text{ mm} \doteq 20 \text{ mm} \quad (5.9.)$$



Obr. 12: Světlost trubky

Nyní mohu přistoupit k výpočtu jmenovitých otáček turbíny, protože již znám všechny potřebné parametry. Jmenovité otáčky vypočítáme jednoduchým dosazením do vzorce

$$n = 9898 \cdot \frac{c_1}{D} = 9898 \cdot \frac{7,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{66,3 \text{ mm}} = 1123 \text{ ot. min}^{-1} \quad (5.10.)$$

Pokud nebude turbína zatížena pomocí generátoru, bude pracovat naprázdno. Takto zatížená turbína bude mít tzv. otáčky naprázdno a ty lze vypočítat pomocí

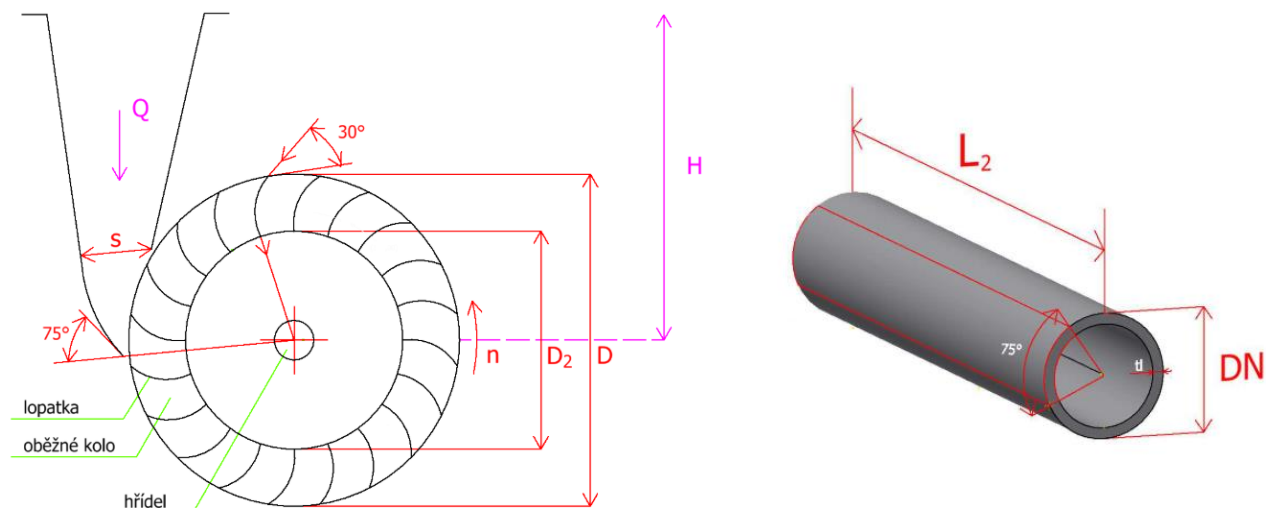
$$n_0 = 1,8 \cdot n = 1,8 \cdot 1123 \text{ ot. min}^{-1} \doteq 2021 \text{ ot. min}^{-1} \quad (5.11.)$$

Ke spojení turbíny s generátorem se používá hřídel, která musí mít také potřebné rozměry, aby vše pracovalo v naprostém pořádku a nedošlo k poškození turbíny či generátoru z důvodu nesprávně zvoleného průměru. Proto se tento průměr musí stanovit dle

$$d_h = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{H \cdot Q}{75 \cdot n}} = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \text{ m} \cdot 3,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}}{75 \cdot 1123 \text{ ot. min}^{-1}}} \doteq 8 \text{ mm} \quad (5.12.)$$

5.2.1 Konstrukce Bánkiho turbíny

Rozložení jednotlivých kót je nutno doložit pomocí Obr. 13. Toto rozložení usnadní správné pochopení jednotlivých parametrů a pomocí něj dojde k vytvoření modelu v programu Autodesk Inventor 2013, ve kterém lze jednoduše vytvořit 2D model, který slouží jako podklad pro vytvoření 3D prototypu. Jeho nespornou výhodou je velmi obsáhlá knihovna spojovacích prvků, ložisek aj., které byly při návrzích jednotlivých součástí nutné.



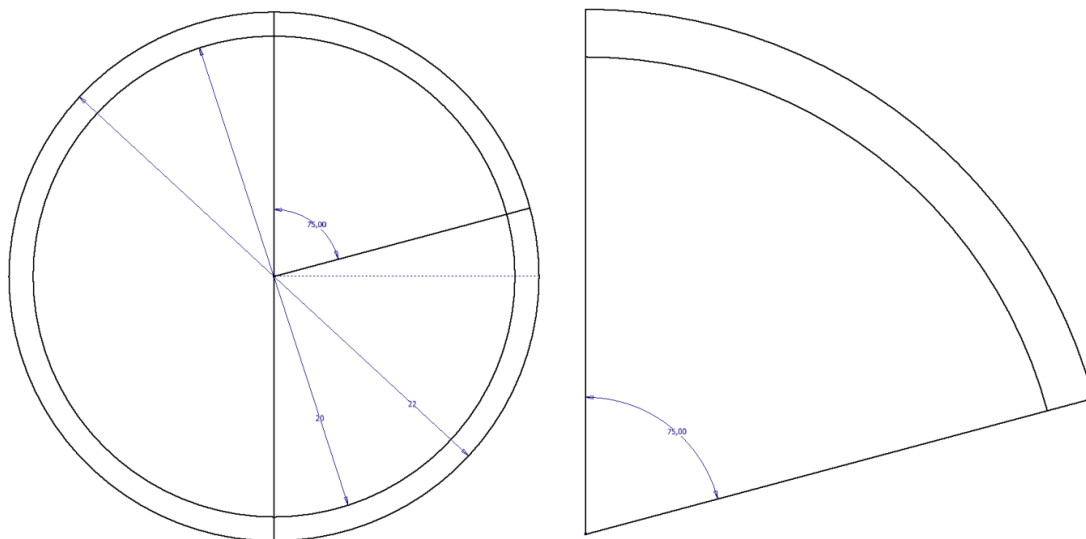
Obr. 13: Vizuální rozložení jednotlivých parametrů Bánkiho turbíny [2]

Parametry Bánkiho turbíny	
Spád H (m)	3
Průtok Q ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3,3
Koeficient L/D K_{ld} (-)	0,5
Koeficient $K_{ostř}$ (-)	0,2
Vstupní rychlost vody c_1 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7,52
Plocha štěrbiny a (m^2)	$4,39\cdot 10^{-4}$
Největší otevření štěrbiny s (mm)	13,25
Vnější průměr kola D (mm)	67
Vnitřní průměr kola D_2 (mm)	44
Délka štěrbiny L (mm)	33
Délka lopatek L_2 (mm)	48
Světlost trubky DN (mm)	20
Jmenovité otáčky n ($\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$)	1123
Otáčky naprázdno n_0 ($\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$)	2021
Počet lopatek	32
Průměr hřídele d_h (mm)	8

Tab. 3: Parametry Bánkiho turbíny pro malou vodní elektrárnu

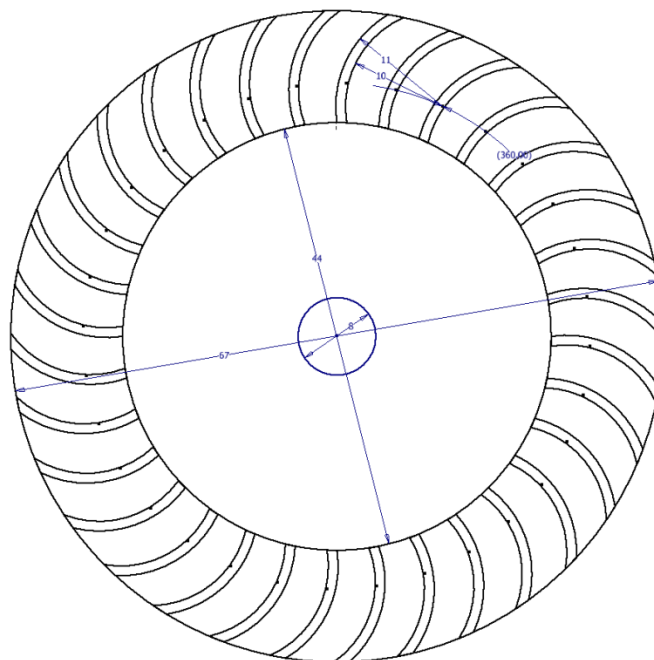
Všechny potřebné hodnoty pro turbínu, která bude použita v návrhu malé vodní elektrárny, byly shrnuty v Tab. 3 dle předchozích výpočtů. Díky získaným hodnotám bude vyhotovena turbína, která bude sloužit k pohonu generátoru. Prvním krokem pro vytvoření základního 2D modelu

bylo získat tvar jedné lopatky. Tento tvar se vytvoří rozdělením trubky o vypočtené světlosti pod úhlem 75° . Postup těchto kroků je znázorněn na Obr. 14.



Obr. 14: Vytvoření lopatky z vypočtené trubky

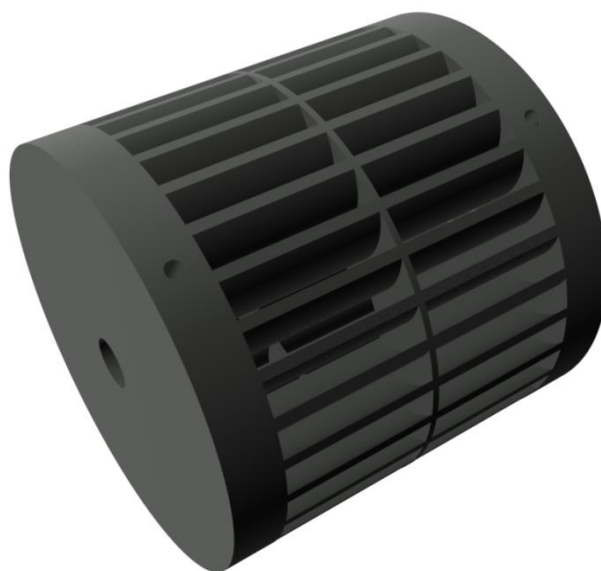
Díky vytvoření tvaru jedné lopatky jsem mohl přistoupit ke konstrukci samotné turbíny. Celkový počet lopatek pro Bánkiho turbínu byl stanoven na 32 kusů. Došlo k rozmístění těchto lopatek rovnoměrně po celém obvodu kruhu turbíny, viz Obr. 15.



Obr. 15: 2D náčrt Bánkiho turbíny

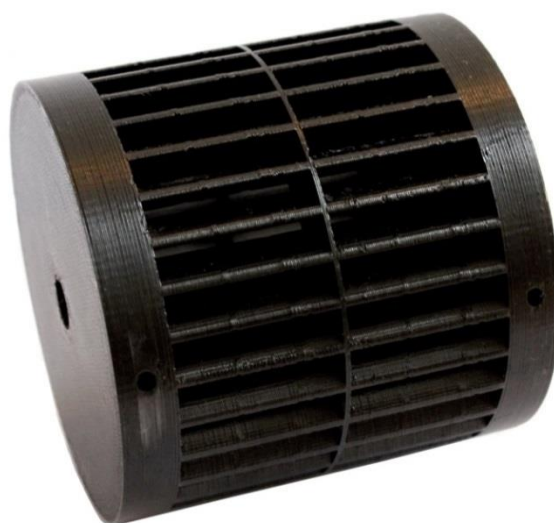
Posledním krokem bylo vytvoření trojrozměrnému modelu, který bude sloužit jako podklad pro tisk na 3D tiskárně (viz příloha), který je možno vidět na Obr. 16.

Pomocí obrázku je možné pozorovat otvor, který je vytvořen v oběžném kole turbíny. Otvor se na každém oběžném kole nachází 3 krát. Každý otvor je posunut o 120° . Tento úhel byl vybrán, aby došlo k rovnoměrnému vyvážení turbíny. Do těchto otvorů bude vytvořen závit o velikosti M3. Otvory budou následně sloužit pro spojení turbíny s hřídelí a pro spojení se použijí „červíky“ se stejným závitem. Pro součásti, které budou v kontaktu s vodou, musí být vybrán vhodný materiál, aby nedocházelo ke korozi.



Obr. 16: 3D model Bánkiho turbíny

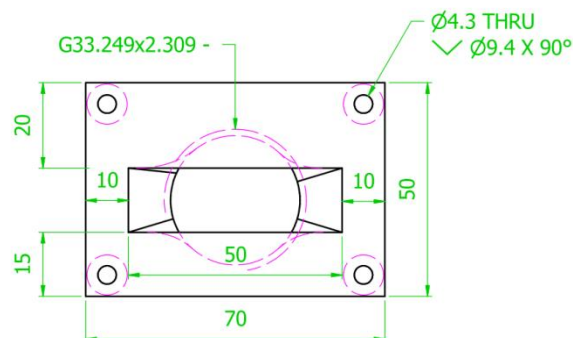
Tisk pomocí 3D tiskárny byl vybrán z toho důvodu, aby byl model co nejvíce věrohodný vymodelovanému modelu. Tento tisk byl proveden na 3D tiskárně, která se nachází na Ústavu konstruování a Fakultě strojního inženýrství, které lze nalézt na Technické 2 v Brně. Tento prototyp lze vidět na Obr. 17. Pokud budu porovnávat původní model s vytvořeným prototypem, nelze zde najít žádnou odlišnost, pouze je zde patrné nanášení vrstev pomocí trysky. Tento jev lze nejvíce pozorovat na lopatkách.



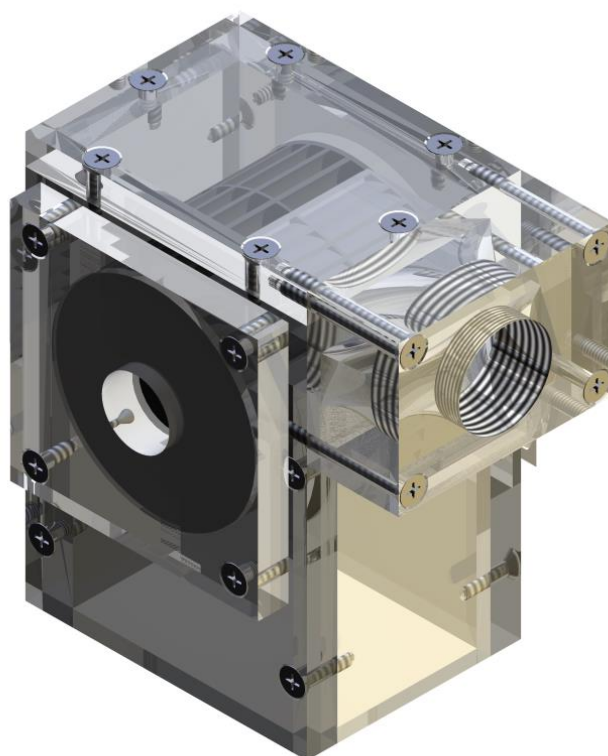
Obr. 17: Prototyp Bánkiho turbíny vytvořený pomocí 3D tiskárny

5.3 Návrh krytu pro Bánkiho turbínu

Velmi důležitým prvkem pro správný chod turbíny je kryt, ve kterém bude uložena turbína. Tento „obal“ bude sloužit pro ochranu turbíny před vnějšími vlivy a také proti úniku kapaliny mimo turbínu. Kryt bude vytvořen z čirého plexiskla, které má tloušťku 10 mm, aby mohlo dojít k pozorování chování turbíny při různých nastaveních. Celkový „obal“ bude složen z osmi kusů, které budou spojeny dohromady pomocí zápusťných šroubů se závitem M4 a délka šroubů se bude lišit podle hloubky vyvrtaných závitů, kde dojde k použití těchto šroubů. Na jednotlivé části, které se budou pomocí šroubů spojovat, bude nanesen silikon, který zabráni úniku vody. Důležitou částí krytu je vtok, ve kterém dochází ke změně tvaru vodního toku z kruhového na obdélníkový. Základní rozměry lze sledovat na Obr. 18 a celková tloušťka tohoto přípravku bude 30 mm. Na jednu stranu vtoku bude připojena plastová vodovodní trubka pomocí trubkového závitu G1 a hloubka závitu bude 20 mm. Na opačné straně je vytvořen obdélníkový otvor, který složí pro rozložení vodního média rovnoměrně do části přivaděče. Součástí vtoku jsou také otvory pro šrouby, které budou sloužit pro spojení ke krytu. Další částí jsou přední a zadní bok, které se budou skládat ze dvou plexiskel, protože tloušťka jednoho nebyla postačující pro otvory, které budou sloužit pro nalisování ložisek o rozměrech 22x8x7 mm. Součástí těchto otvorů budou gufera o rozměrech 22x8x6 mm, které budou uloženy co nejblíže k turbíně. Funkcí gufer je zabránit úniku vody v oblasti okolo hřídele. Celkový vzhled tohoto krytu lze vidět na Obr. 19 a velikost tohoto krytu bude 92x70x125 mm. Podrobné rozměry jednotlivých dílů jsou doloženy v příloze A. Pomocí této přílohy byl vyhotoven reálný kus, který byl použit následně pro tento model malé vodní elektrárny.



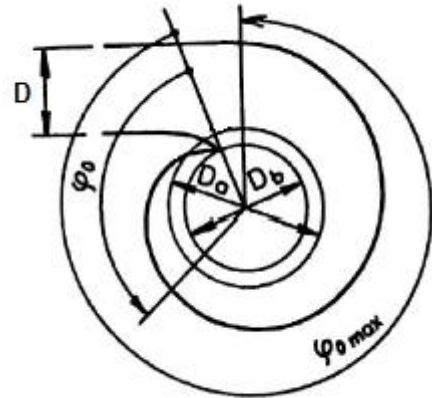
Obr. 18: Rozměry vtokového otvoru



Obr. 19: Kryt turbíny

5.3.1 Hydraulický výpočet přívodu vody

Hydraulický výpočet se provádí pro vytvoření správného tvaru přívaděče, kde dochází k nasměrování přiváděné vody z nádrže na lopatky turbíny. Při nevhodně zvoleném úhlu dopadu vody na lopatky by došlo ke snížení výkonu turbíny. Další negativní vlastností, které je nutno zabránit, je turbulentní proudění. Toto proudění by způsobilo brždění turbíny a nedosahovala by požadovaných parametrů. Prvním krokem je vytyčení úhlu mezi začátkem a koncem požadovaného rádia tzv. úhel obchvatu φ_{0max} . Tento úhel se u přívaděčů, které mají tvar spirály, pohybuje v rozmezí $180^\circ - 345^\circ$. Pro tento model však nepřichází v úvahu přívaděč ve tvaru spirály. Proto byl tento úhel zvolen 40° , protože je přívaděč situován ve vodorovném směru. Dalším důležitým parametrem, který je nutno zvolit, je úhel φ_n . Tímto úhlem se určí počet bodů, podle kterých se bude rádius tvarovat. Jednotlivé úhly lze pozorovat na Obr. 20 [3][11].



Obr. 20: Spirála pro turbínu [3]

Protože úhel obchvatu nemůže z technických důvodů dosahovat 360° , musí být část průtoku Q_T ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) přiváděna na turbínu přímo bez účasti spirály. Zbývající průtok $Q_{poč}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) vstupuje do počátečního profilu spirály a musí být rovnoměrně rozdělen po celé délce. Tuto úvahu lze vyjádřit pomocí vzorce [3]

$$Q_{poč} = Q_T \cdot \frac{\varphi_{0max}}{360^\circ} \quad (5.13.)$$

Při tomto rovnoměrném rozložení průtoku Q_T po celém obvodu rozváděče musí mít rovnice obecnou platnost [3]

$$Q_n = Q_T \cdot \frac{\varphi_n}{360^\circ} \quad (5.14.)$$

Kde Q_n ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je průtok, který přísluší úhlu spirály φ_n , a φ_n úhel měřený od konce spirály. Při vyjádření průtoku Q_T z rovnice (5.13) a dosazením jej do rovnice (5.14), dostaneme

$$Q_n = Q_{poč} \cdot \frac{\varphi_n}{\varphi_{0max}} \quad (5.15.)$$

Rychlost vody po celé délce předpokládáme konstantní, vztah lze (5.15) upravit do tvaru [3]

$$S_n = \frac{Q_{poč}}{v_{sp}} \cdot \frac{\varphi_n}{\varphi_{0max}} = S_{poč} \cdot \frac{\varphi_n}{\varphi_{0max}} \quad (5.16.)$$

kde S_n (m^2) je plocha profilu, který je odkloněn od konce o úhel φ_n , a $S_{poč}$ (m^2) je plocha profilu v jejím počátku. Pomocí tohoto vzorce lze získat potřebný průběh ploch příčných řezů po celé délce zjišťovaného tvaru. Protože se jedná o kruhové profily, lze jednotlivé poloměry ρ_n jednotlivých kružnic určit pomocí vztahu [3]

$$\rho_n = \sqrt{\frac{S_n}{\pi}} \quad (5.17.)$$

Při předpokladu, že se kružnice o poloměru R_n (m) dotýkají vstupních hran lopatek, lze jednotlivé charakteristické profily určit vztažením k ose rotace podle vztahu [3]

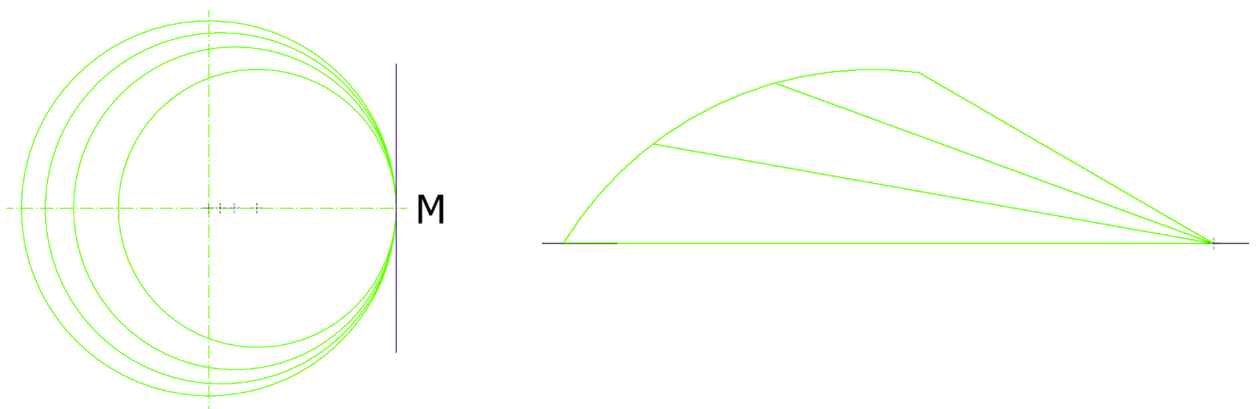
$$R_n = 2 \cdot \rho_n + \frac{D_a}{2} \quad (5.18.)$$

Při návrhu tohoto tvaru se postupovalo tak, že pro zvolené hodnoty φ_n určíme dle rovnice (5.16) odpovídající plochy S_n jednotlivých profilů. Počáteční plocha $S_{poč}$ byla stanovena na velikost $0,00075 \text{ m}^2$ a velikost D_a vychází z rozměrů turbíny a tento rozměr je $0,068 \text{ m}$. Jednotlivé rozměry byly shrnuty do Tab. 4.

φ_{0max}	φ_n	S_n	ρ_n	R_n	D_n
[°]	[°]	[m ²]	[m]	[mm]	[mm]
40	10	0,00019	0,00773	49,45	98,90
	20	0,00038	0,01093	55,85	111,70
	30	0,00056	0,01338	60,76	121,52
	40	0,00075	0,01545	64,90	129,80

Tab. 4: Plochy jednotlivých profilů

Po získání jednotlivých hodnot jsem přistoupil k vytvoření nejdůležitější části přivaděče a to tvaru oblouku, který bude sloužit pro správný nátok vody na turbínu. Při vytvoření náčrtu se vždy uvažuje, že se kružnice o poloměru R_n dotýkají v bodě M, viz Obr. 21. Pomocí tohoto náčrtu lze jednoduše získat potřebný tvar oblouku k turbíně.



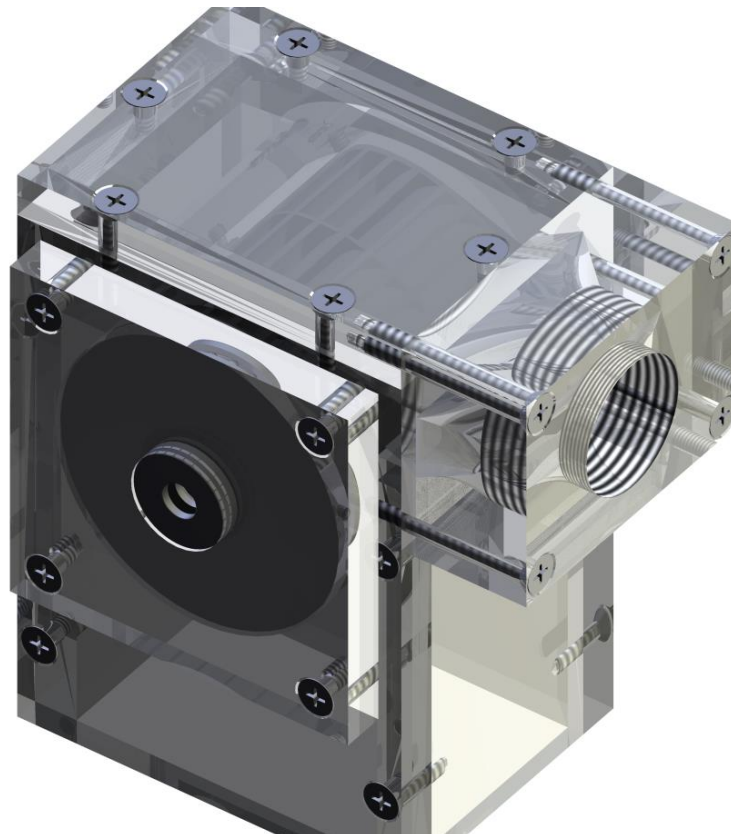
Obr. 21: Pomocný náčrt a tvar nátoku pro turbínu

Díky získanému tvaru oblouku jsem mohl přistoupit k vytvoření tvaru vrchního dílu přivaděče. Rozměry přivaděče se odvíjejí od velikosti krytu pro turbínu. Rozměry byly stanoveny na výšku 20 mm , šířku 82 mm a hloubku 50 mm , aby šel jednoduše vložit do krytu. Dle těchto rozměrů jsem nařezal plexisklo, které se následně začistilo pomocí frézy, a byl vyfrézován konečný tvar vrchního dílu. Nejdůležitějším požadavkem na přivaděč bylo zužování trasy, aby docházelo

k urychlování vodní masy. Spodní část přivaděče je přizpůsobena tak, aby vyhovovala vtokovému otvoru, který je 15 mm vysoký a 50 mm hluboký, a současně, aby docházelo k urychlování vodního toku. Část je přesně vytvarována pomocí frézy, aby dosedla přesně okolo turbíny a nedocházelo k tření mezi turbínou a spodním dílem přivaděče. Vzhled celého přivaděče lze vidět na Obr. 22. Horní díl přivaděče bude připevněn do vrchního plexiskla krytu a spodní díl přivaděče se připevní pomocí dvou šroubů do boční části krytu. Konečný vzhled krytu turbíny, do které byl vložen přivaděč je možno pozorovat na Obr. 23. Rozměry jednotlivých dílů přivaděče lze najít v příloze B.



Obr. 22: Tvar přivaděče



Obr. 23: Kryt turbíny s přivaděčem

5.3.2 Hydraulické řešení sací trouby

Sací trouba neboli savka se používá k využití ztrátové energie vody, která opouští vodní turbínu, kde dochází k snižování výstupních ztrát oběžného kola. Toto zařízení je výhodné použít u turbín s malým spádem. Za žádných okolností nesmí dojít k zavzdušnění a přerušení spojitého vodního sloupce. Savka musí zajistit plného využití spádu. Pro korektní návrh sací trouby se využívá vhodný úhel rozšíření, který se pohybuje v rozmezí $8 - 13^\circ$. Při příliš velkém úhlu by docházelo k odtrhávání proudu od stěn sací trouby, naopak při příliš malém úhlu dochází k prodloužení délky savky. V případě prodloužení savky dochází ke ztrátám vznikajících třením, které pak snižují účinnost přeměny [11].

Proto pro zvolení vhodného vrcholového úhlu vycházím ze vzorce [11]

$$\frac{\sqrt{S_4} - \sqrt{S_3}}{l} = \frac{1}{5} - \frac{1}{8} \quad (5.19.)$$

kde S_4 je výstupní plocha průřezu sací trouby (m^2), S_3 je vstupní plocha průřezu sací trouby (m^2) a l je délka sací trouby (m). Vstupní plochu vypočítám dle

$$S_3 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,08^2}{4} = 0,00503 \text{ m}^2 \quad (5.20.)$$

Plochu S_3 jsem uvažoval dle rozměrů krytu turbíny. Výstupní plochu savky budu uvažovat obdélníkového tvaru a vypočítá se dle

$$S_4 = a \cdot b = 0,11 \text{ m} \cdot 0,11 \text{ m} = 0,0121 \text{ m}^2 \quad (5.21.)$$

Ověření splnění podmínky kuželovitosti dle vzorce 5.19

$$\frac{\sqrt{S_4} - \sqrt{S_3}}{l} = \frac{\sqrt{0,0121} - \sqrt{0,00503}}{0,25} = 0,1563 \quad (5.22.)$$

Podmínka kuželovitosti je splněna, protože se nachází v rozmezí 0,125-0,2. Nyní přistoupím k ověření, zda zvolená délka savky bude vyhovovat tomuto návrhu pomocí [13]

$$l_s = (2,5 - 8) \cdot D_{ok} \quad (5.23.)$$

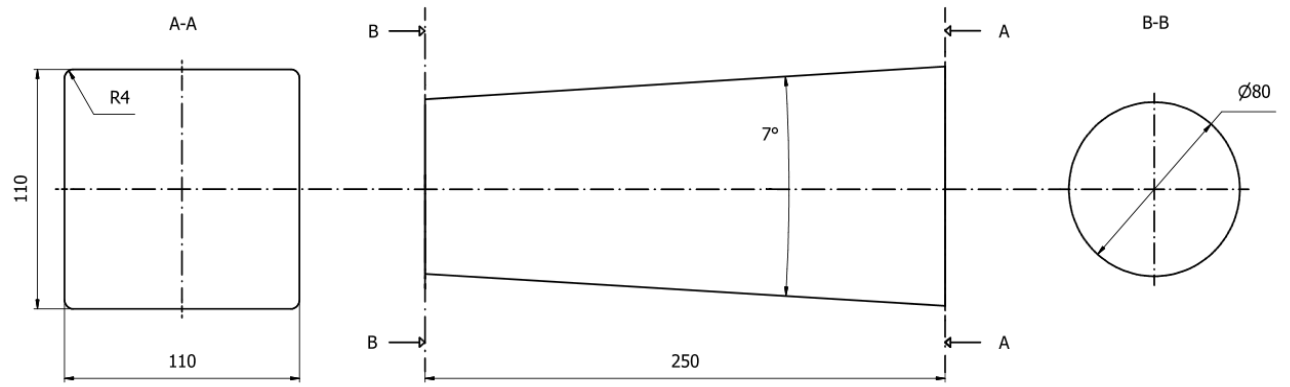
kde l_s je délka sací trouby (m) a D_{ok} je průměr oběžného kola (m). Při upravení původního vzorce 5.23 do tvaru vzorce 5.24 lze jednoduše zjistit, zda délka sací trouby splňuje daný rozsah hodnot.

$$\frac{l_s}{D_{ok}} = 2,5 - 8 \quad (5.24.)$$

Dosazením hodnot do předchozího vzorce lze vidět, že savka splňuje doporučené parametry.

$$\frac{0,25}{0,068} = 3,68 \quad (5.25.)$$

Poslední parametr, který je nutno dodržet, se nazývá úhel difuznosti savky, který musí dosahovat hodnot v rozmezí $2\theta = 6 - 18^\circ$ [13]. Po vytvoření navrhnutého modelu pomocí grafického programu lze bez sebemenších potíží tento úhel zjistit. Tento úhel pro navrhnutou savku činí 7° . Jednotlivé rozměry sací trouby lze vidět na Obr. 24.



Obr. 24: Rozměry savky

5.4 Generátor

Pro navrhovaný model malé vodní elektrárny byl vybrán alternátor od společnosti Magnetron typ 9513021, který nejlépe splňoval požadavky pro spojení pomocí hřídele. K výběru alternátoru také přispěl jeho maximální proud, který je schopný vydržet kvůli zkouškám zkratové odolnosti při různých druzích zkratu jako jsou:

- jednofázový zkrat
- dvojfázový zkrat
- třífázový zkrat

Konstrukci tohoto stroje je možno pozorovat na Obr. 26 a jeho jednotlivé parametry lze vidět v Tab. 5. Alternátor je točivý elektrický stroj, který bude sloužit k přeměně pohybové energie rotačního pohybu dodávanou pomocí turbíny na elektrickou energii.

<i>Magnetron typ 9513021</i>	
Nominální napětí	14 V
Jmenovitý proud při 1800 ot.min ⁻¹	28 A
Jmenovitý proud při 6000 ot.min ⁻¹	55 A
Nulové otáčky	1000 ot.min ⁻¹
Maximální otáčky	13000 ot.min ⁻¹
Hmotnost	4,9 kg

Tab. 5: Parametry alternátoru

Alternátor je sestrojován s diodovým usměrňovačem, protože generátor je původně konstruován pro výrobu stejnosměrného napětí pro dobíjení baterií v osobních automobilech či zemědělských strojích. Tyto diody lze vidět na Obr. 25. Pro náš účel však stejnosměrné napětí není žádoucí, protože by celý model musel být doplněn pomocí měniče, který by toto DC napětí musel transformovat zpět na AC napětí, a došlo by k zbytečným ztrátám. Proto dojde k modifikaci tohoto alternátoru, odstraní se diodový usměrňovač a budeme využívat střídavé napětí dodávané přímo z alternátoru.



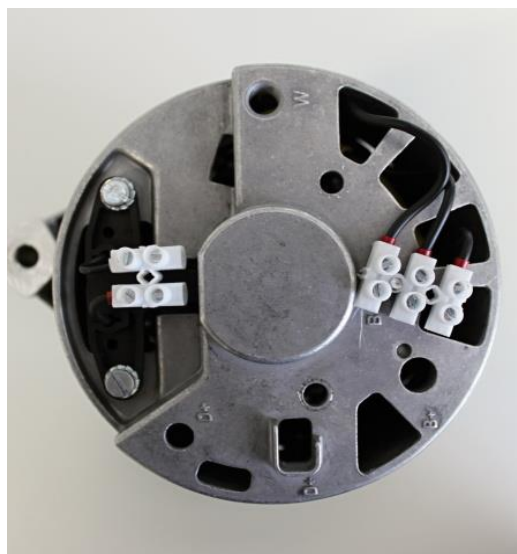
Obr. 26: Alternátor Magnetron



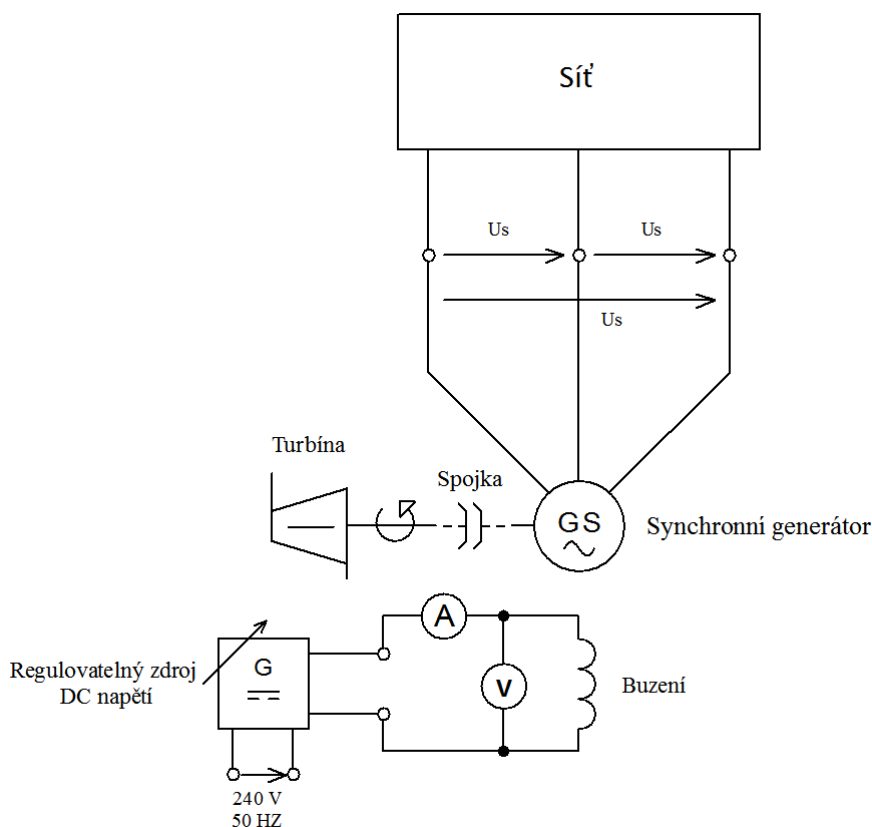
Obr. 25: Polovodičové diody

5.4.1 Zapojení alternátoru

Po odstranění jednotlivých diod, které sloužily k usměrnění střídavého napětí na stejnosměrné, došlo k napájení nových kabelů na vyvedené statorové vinutí. Protože se jedná o třífázový stroj, budou vyvedeny tři vodiče, které se musejí vhodně uložit do krytu alternátoru tak, aby nedošlo k nechtěnému zamotání statorových vodičů do rotoru a tím k jeho zničení. Vodiče se připojí na svorkovnici, která je připevněna na venkovní části obalu alternátoru. Další modifikací, která na alternátoru proběhla, bylo odstranění napěťového regulátoru, který byl určen pro buzení rotorového vinutí na stejnosměrné napětí. Místo regulátoru bylo nahrazeno dvěma vodiči, které jsou vyvedeny stejným způsobem jako vodiče od statorového vinutí. Druhý konec těchto vodičů byl spojen s uhlíkovými kartáči, které dosedají na sběrací kroužky rotoru. Buzení bude prováděno pomocí připojeného regulovatelného stejnosměrného zdroje, který nahradí původní regulátor. Při tomto zapojení je výstupní napětí alternátoru ve sdružených hodnotách. K získání fázových hodnot napětí a proudu bylo zapotřebí vyvést z generátoru tzv. plovoucí nulu. Pro získání potřebných veličin stačí připojit měřicí přístroje mezi plovoucí nulu a svorky generátoru a měřit požadované veličiny (napětí, proud). Síť, do které byl alternátor připojen, byla reprezentována pomocí tří odporů stejných parametrů, které zaručily symetrické zatížení.



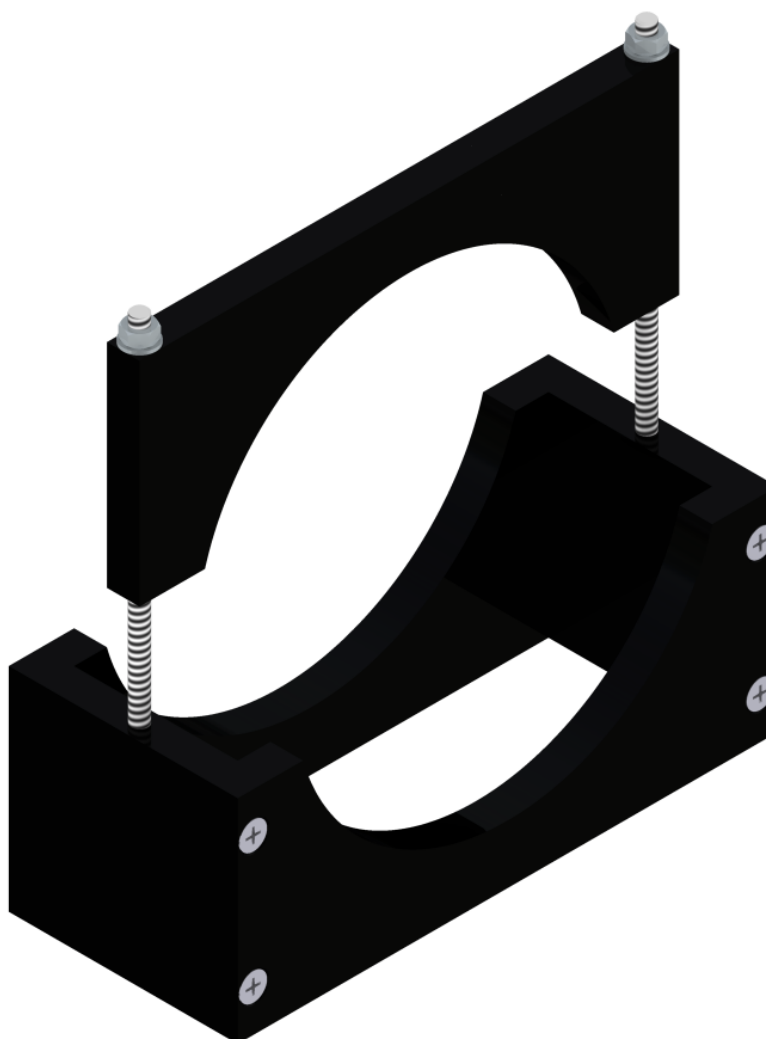
Obr. 27: Modifikace alternátoru



Obr. 28: Schéma zapojení alternátoru

5.4.2 Uchycení generátoru

Aby nedocházelo k nechtěnému chvění či posunu a zajištění osové rovnosti mezi alternátorem a krytem turbíny, bylo zapotřebí navrhnout vhodný způsob pro připevnění alternátoru. Nejvhodnějším způsobem, jak tuto operaci provést, je vytvořit držák, který bude sloužit pro pevné mechanické spojení s pracovní deskou stolu pomocí zápusných šroubů a současně bude dosaženo pevného spojení mezi dílem a alternátorem. Pro tento případ byl navržen přípravek, který se skládá z pěti hlavních dílů a závitové tyče o velikosti M5 a spojovacích pomůcek. Tento držák pro alternátor lze vidět na Obr. 29. Jednotlivé díly jsou vyrobeny z PE desky, která je dostatečně pevná a vydrží takové namáhání. Deska byla rozdělena na jednotlivé části pomocí kotoučové pily. Do předního a zadního dílce byly vytvořeny otvory o průměru 5mm pomocí stojanové vrtačky a současně kuželové zahloubení, které bude sloužit pro uložení zápusných šroubů s křížovou drážkou. Boční dílce slouží jako spojovací část celého držáku. Do těchto dílů bylo vytvořeno 5 děr, ve kterých se nachází závit o velikosti M5. Čtyři z těchto otvorů slouží pro spojení předního a zadního dílu a poslední otvor slouží pro uchycení závitové tyče, která přitáhne pomocí vrchního dílu alternátor přesně do určité polohy a nebude docházet k vibracím. Vrchní díl má stejné rozměry jako přední a zadní díl, jediný rozdíl však spočívá ve vyvrtných otvorech pro závitovou tyč. Rozměry jednotlivých dílů lze najít v příloze C.



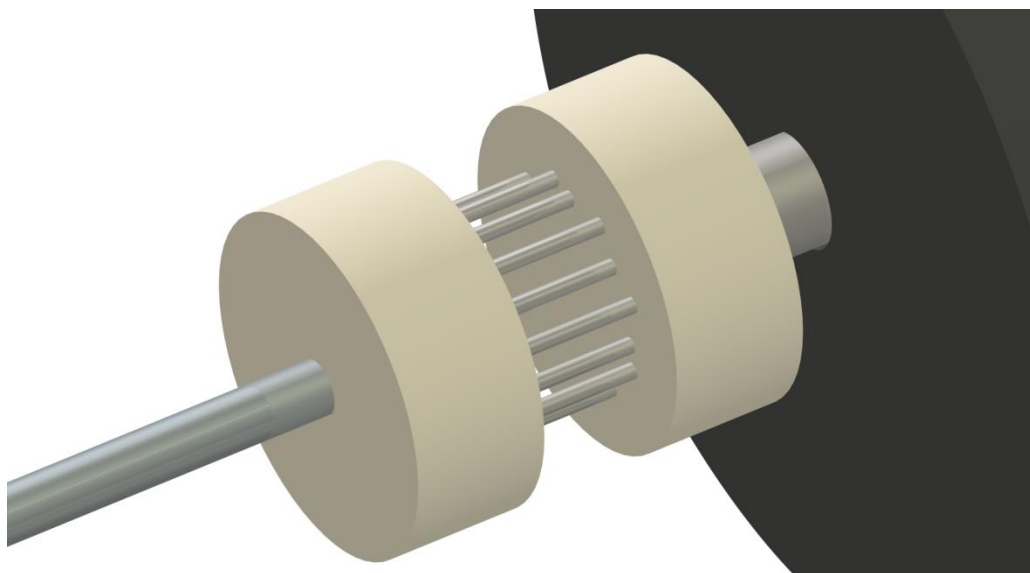
Obr. 29: Uchycení alternátoru

5.5 Hřídel

K přenášení točivého momentu turbíny se používá hřídel. Jako vhodný materiál hřídele byla použita nerezová ocel. Její předností je odolnost vůči korozi při kontaktu s vodou. Průměr hřídele d_h byla spočítána v předchozí části práce dle vzorce 5.12 a velikost byla vypočítána na 8 mm. Délka hřídele byla stanovena na 120 mm. Na jedné straně hřídele bude vytvořen metrický závit o velikosti M8, jeho směr bude pravotočivý a hloubka závitů je stanovena na 15 mm. Hřídel bude dále usazena pomocí ložisek v krytu turbíny.

5.6 Propojení alternátoru s turbínou

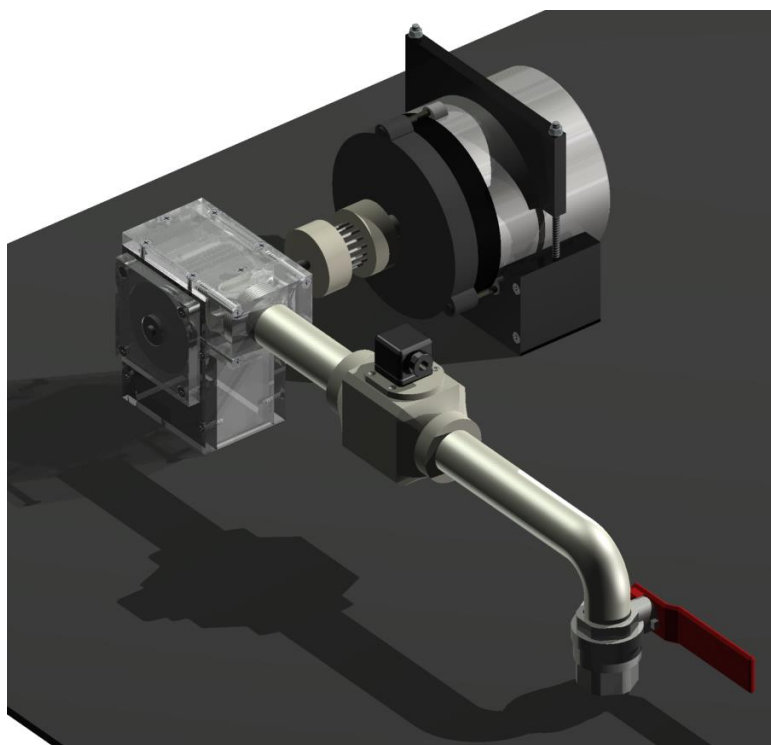
Aby docházelo k přenosu točivé energie mezi hřídelí a alternátorem je třeba tyto dva prvky spojit. První problém nastává v různých rozměrech závitů. Na hřídeli se nachází závit o velikosti M8 a hřídel alternátoru má závit M16. Spojení těchto různých hřídelí provedu pomocí mechanické spojky, která se bude skládat ze dvou částí. Tato spojka bude vyrobena z teflonu, který lze jednoduše obrábět pomocí soustruhu. Rozměry těchto dílů budou naprosto totožné, jediný rozdíl bude spočívat ve vytvořeném závitě. Jejich průměr bude 50 mm a tloušťka 25 mm. Na jedné straně bude tedy vytvořen závit pro hřídel alternátoru nebo hřídel turbíny a na druhé straně dojde k vytvoření otvorů o průměru 2,2 mm a hloubce 15 mm. Tyto otvory jsou od sebe vzájemně posunuty o 40° a počet otvorů bude 9. U otvorů dojde následně k zasunutí ocelového válcového kolíku o velikosti 2,4 mm, jehož délka bude 30 mm. Díky rozdílným průměrům ocelového kolíku bude spoj dostatečně pevný a ze spojky bude vyčnívat 20 mm drátu. Tyto dva díly budou následně do sebe spojeny. Spojení těchto částí bude provedeno pomocí vlasce, který se bude proplétat mezi jednotlivými ocelovými kolíky. Výhodou této spojky je, že hřídel alternátoru a turbíny nemusí být přesně v rovině osy. Vzhled této spojky lze vidět na Obr. 30.



Obr. 30: Spojka

5.7 Okruh vody

Nedílnou součástí tohoto modelu je propojení čerpadla, které se nachází v barelu pod pracovní deskou s nátokem, který lze sledovat na krytu turbíny. Pro konečný model se využilo plastového potrubí o průměru 32 mm. Jednotlivé spoje tohoto potrubí byly provedeny pomocí polyfúzní nožové svářečky, která rozehřeje plast na teplotu, při kterém dochází k natavení plastu. Díky tomuto natavení lze jednotlivé díly spojit dohromady a při ochlazení vznikne pevný i vodotěsný spoj. Celkový vzhled tohoto okruhu lze pozorovat na Obr. 31. První část potrubí, která se nachází mezi nátokem a průtokoměrem, musí být minimálně 12,5 cm dlouhá. Tato



Obr. 31: Okruh vody

podmínka je způsobena zařazeným průtokoměrem, který potřebuje tuto minimální délku pro správné měření. Nakonec byla zvolena délka potrubí 13 cm, čímž došlo ke splnění této podmínky. Na straně, kde se nachází nátok, byl vytvořen venkovní trubkový závit o velikosti G1. Na druhý konec byla navařena přechodka se závitem G1 a došlo k namontování této trubky do přípravku v krytu. Potrubí, které je spojeno s druhou stranou průtokoměru, je vybaveno stejnou průchodkou

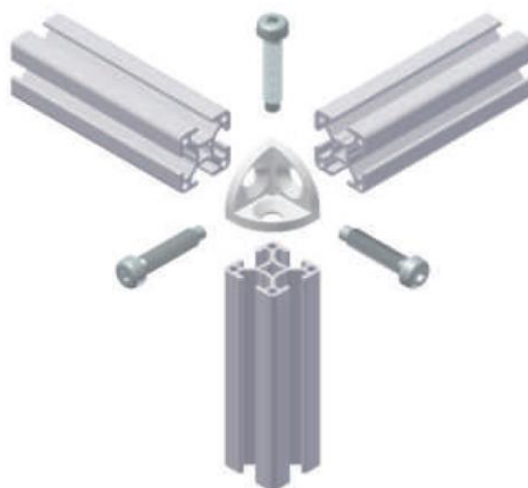
se závitem. Ke druhému konci bylo navařeno koleno s úhlem 90°. Na konec kolena byla navařena další trubka, která byla vytvořena s venkovním závitem G1, který byl našroubován do kulového ventilu. Na částech, kde se nacházel závit, byla namotána teflonová páska, která slouží proti úniku vody a povolení. Druhá část ventilu je stáhnuta pomocí matky k pracovní desce, aby nedocházelo ke chvění potrubí při průchodu média. Do této části (nelze na obrázku vidět) je našroubována trubka, která je dlouhá 10 cm a na tuto trubku se navleče zahradní hadice o velikosti 5/4, která se stáhne pomocí svorky. Druhý konec této hadice bude připevněn pomocí svorky k vývodu čerpadla. Pro požadovaný průtok vody na přivaděč se využívá kulový ventil. Při poloze, kterou lze pozorovat na obrázku, je ventil uzavřen a s pohybem vzhůru dochází k pozvolnému otevírání. Jako zásobárna vody se použil 200 l sud. Tento objem byl zvolen kvůli chlazení čerpadla a také v důsledku vytékající vody, která dopadá na vodní hladinu uvnitř sudu. Zde dochází k jejímu zavzdušňování na hladině. Takto zavzdušněnou vodu by čerpadlo následně čerpalo zpět na turbínu a nebyl by využit plný potenciál turbíny.

5.8 Konstrukce modelu

Po vytvoření jednotlivých dílčích částí modelu se mohlo přistoupit ke konstrukci kostry pracovního stolku, která bude sloužit pro malou vodní elektrárnu. Ta musí splňovat požadavky, aby bylo zařízení snadno přenosné a prostorově skladné. Pro konstrukci byl použit stavebnicový systém od společnosti FM-SYSTEME. Hlavní částí tohoto systému jsou hliníkové profily, které mají vytvořeny drážky, do kterých lze použít různé druhy spojovacích prvků. Pro tuto konstrukci byly zvoleny hliníkové profily o velikosti 30x30 mm, které mají dostatečnou nosnost pro tento model. Jednotlivé profily byly dodány ve 3 metrových délkách a bylo je nutno nařezat pomocí pásové pily na potřebné rozměry pro konstrukci. Rozměry jednotlivých dílů lze vidět v příloze D. Pro vrchní hrany „stolku“ jsem použil speciální rohový spoj, který lze vidět na Obr. 33. V přípravku jsou vytvořeny tři otvory, do kterých se vloží samořezné šrouby s imbusovou hlavou, díky kterým dojde ke spojení jednotlivého profilu. Tento spoj je upraven tak, aby drážky jednotlivých profilů dosedly na přesné místo a tím zaručily rovnost mezi spojovanými profily. Po vytvoření všech rohů pracovního stolu jsem mohl přistoupit ke spojení jednotlivých dílů.



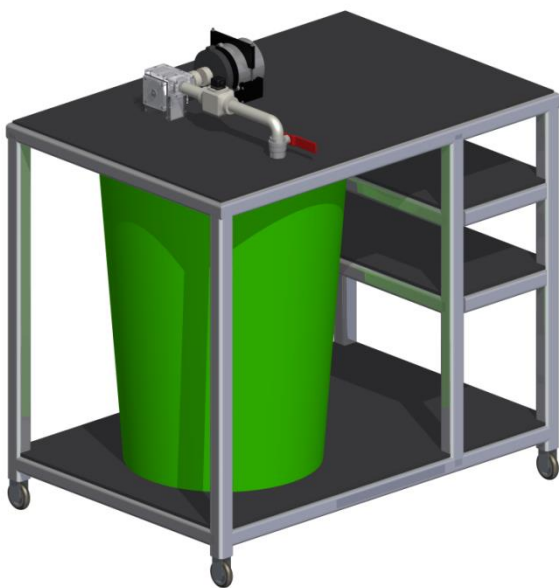
Obr. 32: Úhelníkový spoj [10]



Obr. 33: Rohový spoj [10]

Spojení dílů bylo provedeno pomocí úhelníků Obr. 32, ve kterých se nacházely dva šrouby a matky, které byly speciálně upraveny pro drážky, do kterých po utáhnutí přesně zasedly a vytvořily pevný spoj. Takto docházelo ke spojení vždy dvou profilů. Po spojení jednotlivých dílů vznikla kostra, která se dále modifikovala. První modifikací bylo připevnění pomocného hliníkového profilu do spodní části konstrukce. Tento profil bude sloužit k rozměrnému rozložení hmotnosti sudu, který bude částečně naplněn vodou. Dalším krokem došlo k připevnění koleček, která zaručí pohodlné manipulování při plné hmotnosti modelu. Po vytvoření finální konstrukce došlo k nařezání polyethylenové (PE) tabule na potřebné rozměry jednotlivých desek. Vrchní a spodní pracovní deska mají stejné rozměry, jediný rozdíl spočívá v tom, že ve spodní desce jsou vytvořeny otvory, které slouží k pohodlnému uložení desky do konstrukce. Dalším úkolem těchto otvorů je zabránění libovolného posouvání desky na konstrukci. Desky, které byly použity pro úložné prostory, mají vytvořeny otvory, které přesně zapadnou do konstrukce a díky těmto otvorům se nemusí použít šroubové spoje kvůli nechtěnému pohybu. Pouze vrchní pracovní deska je připevněna ke konstrukci pomocí zápusťných šroubů o velikosti M5. Protože tato deska byla použita pro připevnění jednotlivých prvků modelu malé vodní elektrárny, po připevnění pracovní desky došlo k rozměření vhodné polohy pro kryt turbíny. Před upevněním krytu byl

vytvořen otvor, který slouží jako odtok pro vodu, která prošla přes turbínu. Pomocí tohoto otvoru dochází k plynule cirkulaci média a nedochází k nechtěnému úniku vody mimo uzavřený okruh vody. Před sestavením krytu došlo k vložení turbíny, která byla spojena s hřídelí. Pomocí hřídele a ložisek se turbína přesně vystředila do otvoru, který byl v krytu pro tento účel vytvořen. Po tomto vystředění došlo ke složení krytu a následnému připevnění na určenou pozici. Na hřídel se připevnila první část spojky. Druhá část byla namontována na hřídel alternátoru. Po připevnění jednotlivých spojek mohlo dojít k rozměření přípravku, který slouží pro uchycení alternátoru. Zde muselo být zajištěno, aby byla hřídel alternátoru a turbíny v rovině. Osová nerovnost se vyřešila pomocí spojky. Po rozměření se držák připevnil pomocí šroubů o velikosti M5 do desky. Dále následovalo uchycení alternátoru do přípravku a vystředění spojek. Po jejich vystředění jsem přistoupil k vytvoření pohyblivého spoje díky navlečení vlasce mezi jednotlivé části spojky. Posledním krokem bylo vytvoření otvoru pro plastové potrubí pomocí vykrúžovacího vrtáku, ke kterému je připevněn kulový ventil. Průměr tohoto otvoru je 33 mm. Následně došlo k sestavení celkového okruhu vody a tento postup je popsán v předchozí kapitole 5.7. Posledním součástí, kterou bylo nutno do modelu vložit, byl sud, který bude sloužit jako zásobárna vody pro model. Po uložení sudu na vhodné místo jsem přistoupil k dokončení okruhu vody, ve kterém se nachází nejdůležitější část celého modelu a to čerpadlo, které bude přivádět vodu na turbínu. Čerpadlo bylo nejdříve upraveno tak, aby plovák, který slouží k jeho zapínání a vypínání byl vždy v zapnuté poloze. Po této modifikaci jsem vložil čerpadlo do sudu a na vývod z čerpadla, který má rozměr 5/4, byla připevněna zahradní hadice pomocí stahovací svorky. Druhý konec této hadice byl následně připevněn do plastové vodovodní trubky, která je upevněna pomocí kulového ventilu a matky do pracovní desky. Pevného spojení mezi zahradní hadicí a deskou bylo provedeno stejně jako u části hadice a čerpadlo a to pomocí svorky, která se utáhla na potřebnou velikost.

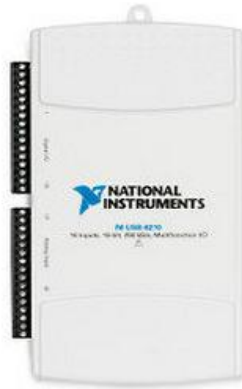


Obr. 34: Počítačový model a reálný vzhled

6 MĚŘENÍ VÝSTUPNÍCH VELIČIN MODELU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Pro získání potřebných hodnot v reálném čase je nejvýhodnější použít program LabVIEW, protože tento program obsahuje rozsáhlou podporu pro různá zařízení. Uživatelé mohou používat různá rozhraní jako USB, GPIB nebo sériový port. Součástí tohoto programu jsou podpory pro různé hardwarové platformy jako CompactDAQ nebo CompactRIO, kde se nachází velký počet specifických bloků zařízení pro tento hardware a také měření a automatizace.

Pro navrhnutý model malé vodní elektrárny se nejvíce hodí měřicí karta Ni USB-6210, která slouží ke komunikaci se stolním počítačem popřípadě jiným zařízením. Tato karta obsahuje 16 analogových vstupů, dále čtyři digitální vstupy a čtyři digitální výstupy, dále dva 32-bitové čítače. Pro komunikaci se využívá USB modul. Tento modul obsahuje nové datové proudy signálu NI technologie, která umožňuje vysokorychlostní přenos dat pomocí USB. Vzhled této karty lze pozorovat na Obr. 35.



Obr. 35: Karta Ni USB 6210

Veličiny, které je nutno získávat jsou shrnuty v Tab. 6. Díky výběru těchto veličin lze následně dopočítat parametry, které nás nejvíce zajímají. Díky změřenému průtoku lze vyčíst z charakteristiky čerpadla Obr. 9 spád, při kterém pracuje čerpadlo, které je součástí modelu. Ze získaných veličin lze následně vypočítat výkon turbíny. Pomocí výkonu turbíny a změřených otáček lze následně vypočítat moment, který dokáže turbína vytvořit. Díky hodnotám napětí a proudu je možné následně vypočítat výkon, který je dodávaný pomocí alternátoru. Pomocí změřené frekvence lze následně ověřit například počet otáček.

Požadované veličiny	
Průtok	l.s^{-1}
Otáčky	m.s^{-1}
Frekvence	Hz
Napětí	V
Proud	A
Tlak	Bar

Tab. 6: Měřené veličiny

7 ŘÍZENÍ MODELU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

K řízení navrhnutého modelu malé vodní elektrárny se bude využívat čerpadlo, které je důležitým prvkem pro pohon turbíny. Čerpadla nejčastěji obsahují asynchronní motory s rozběhovým kondenzátorem. U asynchronních motorů se nejvíce využívá regulace otáček pomocí změny kmitočtu. Změna kmitočtu se provádí nejčastěji pomocí frekvenčního měniče. Pomocí kombinace frekvenčního měniče a asynchronního motoru lze dosáhnout téměř stejných vlastností jako u stejnosměrných motorů (konstantního momentu). Toto řízení je v dnešní době velice populární kvůli cenové dostupnosti frekvenčních měničů. Jediným nedostatkem při řízení jednofázového asynchronního motoru s rozběhovým kondenzátorem pomocí frekvenčního měniče je, že lze dosáhnout pouze řízení přibližně do 50% jmenovitých otáček stroje [14].

Regulace bude spočívat v propojení jednofázového čerpadla s frekvenčním měničem. Čerpadlo při nominálním zatížení propouští určité množství vody (průtok), které je snímáno pomocí průtokoměru a tento průtok souvisí také s výtlačnou výškou hladiny, do které čerpadlo vodu dodává. V tomto návrhu uvažuji konstantní výtlačnou výšku. Po spojení čerpadla s frekvenčním měničem lze měnit otáčky čerpadla a jimi bude ovlivněn průtok. Pokud dojde k odlehčení alternátoru, není zapotřebí takový dodávaný průtok a dojde k snížení otáček. Naopak pokud dojde k zatížení alternátoru, otáčky bude nutno zvýšit.

Pro řízení lze použít frekvenční měnič od společnosti Invertek typu OptidriveE2 1phase o jmenovitém výkonu 1,1 kW, který je určen pro motory s rozběhovým kondenzátorem. Jednotlivé vlastnosti a zapojení digitálních či analogových vstupů či výstupu lze nalézt v Tab. 7 a Tab. 8.



Obr. 36: Frekvenční měnič [15]

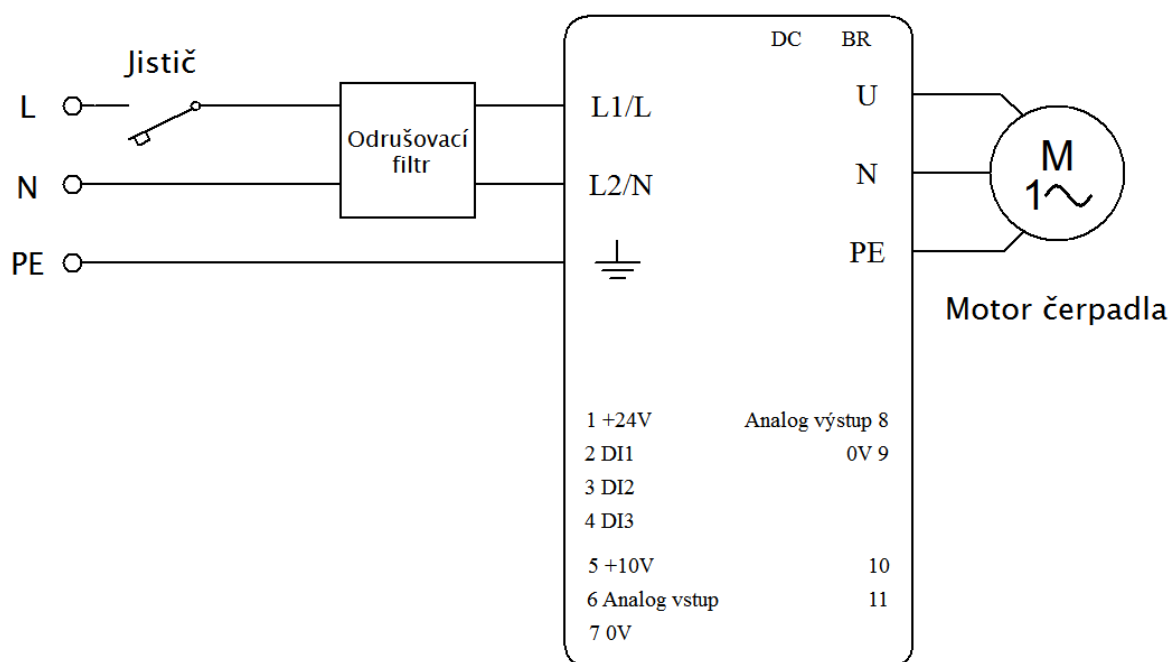
Základní vlastnosti
ovládací panel (indikace otáček a proudu)
odrušovací filtr standardně v měniči
PI regulátor standardně v měniči
pro výkon 1,1kW integrovaný brzdňý tranzistor
elektronické ochrany motoru a měniče
přetížení 150% po dobu 60 sekund
pracovní teplota okolí 0°C až +50°C
výstupní frekvence 0 až 500Hz
krytí IP20 / IP66

Tab. 7: Vlastnosti frekvenčního měniče [15]

Svorka č.	Signál	Řízení a programování
1	+24V	4 programovatelné digitální vstupy
2	Digitální vstup č. 1	analogový vstup 0-10V; 0-20mA; 4-20mA
3	Digitální vstup č. 2	programovatelný digitální výstup
4	Digitální vstup č. 3 / analogový vstup č. 2	programovatelný analogový výstup
5	+10V	5 přednastavitelných rychlostí
6	Analogový vstup č. 1 / digitální vstup č. 4	RS485 (protokol Modbus RTU, Optibus)
7	0V	zakázaná frekvence
8	Analogový vstup / digitální vstup	paměť posledních 4 chyb
9	0V	zamknutí parametrů
10	Kontaktní relé	
11	Kontaktní relé	

Tab. 8: Možnosti frekvenčního měniče a značení svorek [15]

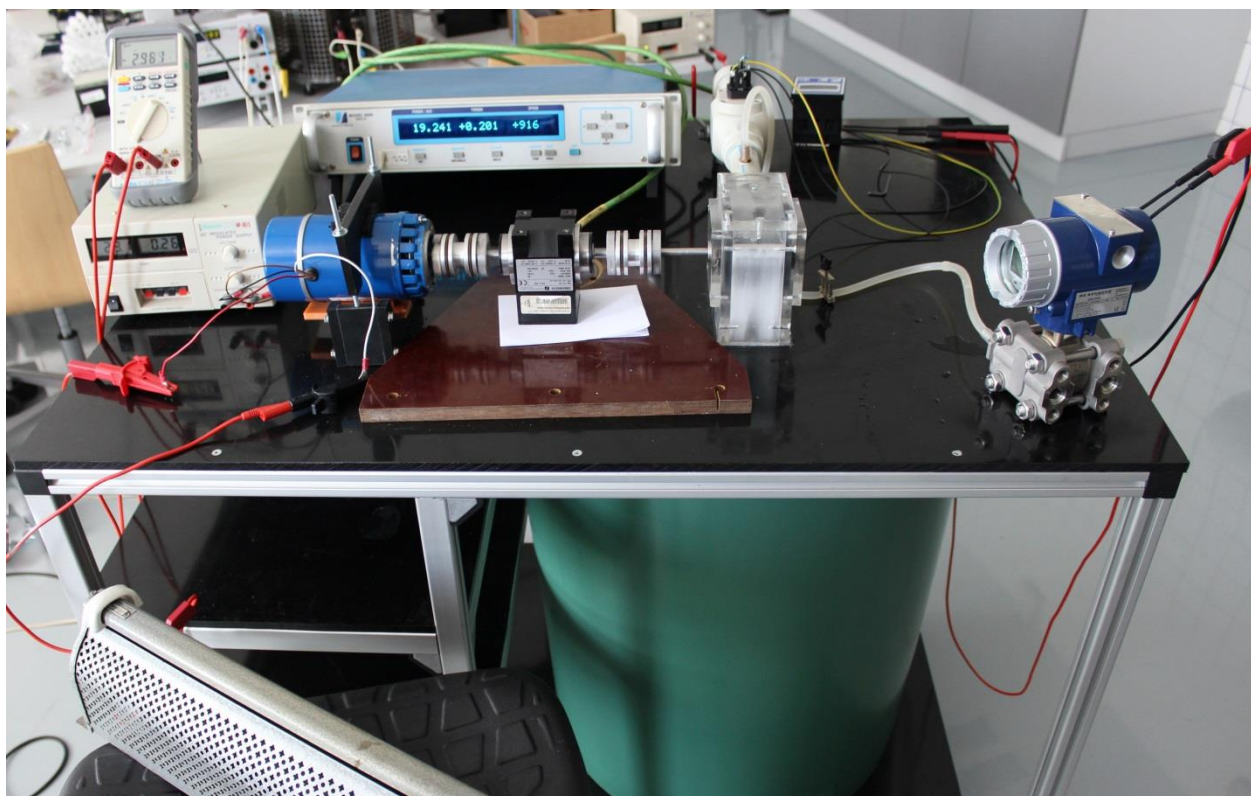
Na Obr. 37 lze vidět základní zapojení silové části pro řízení čerpadla pomocí frekvenčního měniče. Frekvenční měnič je nutno jistit pomocí jističe při vzniku poruchy, aby nedošlo k poškození celého zařízení.



Obr. 37: Schéma zapojení frekvenčního měniče

8 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM MODELU

Po sestavení a oživení modelu jsem mohl přistoupit k měření požadovaných veličin. První měření bylo provedeno pomocí dynamometru, kde došlo ke spojení turbíny s normalizovaným motorem, který dosahoval výkonu 60 W. Podmínkou bylo zajištění osové rovnosti a výšky kvůli možnému poškození měřícího zařízení, popřípadě turbíny viz Obr. 38. Pro měření reálného průtoku byl použit průtokoměr, který byl propojen s vyhodnocovací jednotkou, na které došlo k nastavení impulsů pro správný převod mezi čidlem na průtokoměru a jednotkou. Pro měření reálného spádu byl použit diferenční tlakoměr, do kterého byla připojena hadička, která je vyvedena z PPR (polypropylenové) trubky.



Obr. 38: Zapojení dynamometru a periferií

První měření bylo provedeno pro zjištění mechanických ztrát turbíny. Turbína byla roztočena pomocí normalizovaného motoru na požadované otáčky. Při těchto otáčkách došlo k odečtu výkonu, který reprezentoval mechanické ztráty. Měření bylo provedeno pro nominální otáčky, které byly uvažovány při hodnotě 1100 ot.min^{-1} , a pro maximální otáčky s hodnotou 1900 ot.min^{-1} . Hodnoty zjištěné při tomto měření lze nalézt v Tab. 9.

n	ΔP_{mech}
[ot.min^{-1}]	[W]
1100	8,3
1900	12,5

Tab. 9: Mechanické ztráty turbíny

Po zjištění mechanických ztrát následovalo změření spádu a průtoku, které dodává čerpadlo. Pro nominální napětí 230 V bylo změřeno, že čerpadlo dodává vodu se spádem $H = 3,17$ m a průtokem $Q = 1,28$ l.s⁻¹. Tento průtok a spád se po celou dobu měření nezměnil a proto je lze uvažovat za konstantní. Dále následovalo změření otáček a momentu. Poté jsem přistoupil k dopočítání výkonu turbíny při různých otáčkách pomocí vzorce [16]

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot M \cdot n}{60} \quad (8.26.)$$

kde P je výkon turbíny (W), n jsou otáčky motoru (ot.min⁻¹) a M je točivý moment (Nm).

n (ot.min ⁻¹)	M (Nm)	P (W)
1900	0,022	4,38
1800	0,038	7,16
1700	0,058	10,32
1600	0,078	13,06
1500	0,093	14,60
1400	0,121	17,73
1300	0,139	18,91
1200	0,165	20,72
1100	0,181	20,84
1000	0,191	19,99
900	0,212	19,97
800	0,230	19,26

Tab. 10: Naměřené a vypočítané hodnoty

Příklad výpočtu pro řádek 4.

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot M \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,078 \text{ Nm} \cdot 1600 \text{ ot. m}^{-1}}{60} = 13,06 \text{ W} \quad (8.27.)$$

Z naměřených a dopočtených hodnot jsem vytvořil grafickou závislost výkonu a momentu při měnících se otáčkách viz Obr. 39. Díky naměřeným hodnotám jsem zjistil, že turbína dosahuje maximálního výkonu při 1100 ot.min⁻¹ a tento výkon je 20,84 W. Pokud znám výkon, průtok a otáčky, mohu zjistit reálnou účinnost turbíny podle vzorce 3.12, který upravím do tvaru

$$\eta_t = \frac{P}{9,81 \cdot H \cdot Q} \quad (8.28.)$$

Pomocí předchozího vzorce 8.28 nyní přistoupím k výpočtu reálné účinnosti navržené turbíny

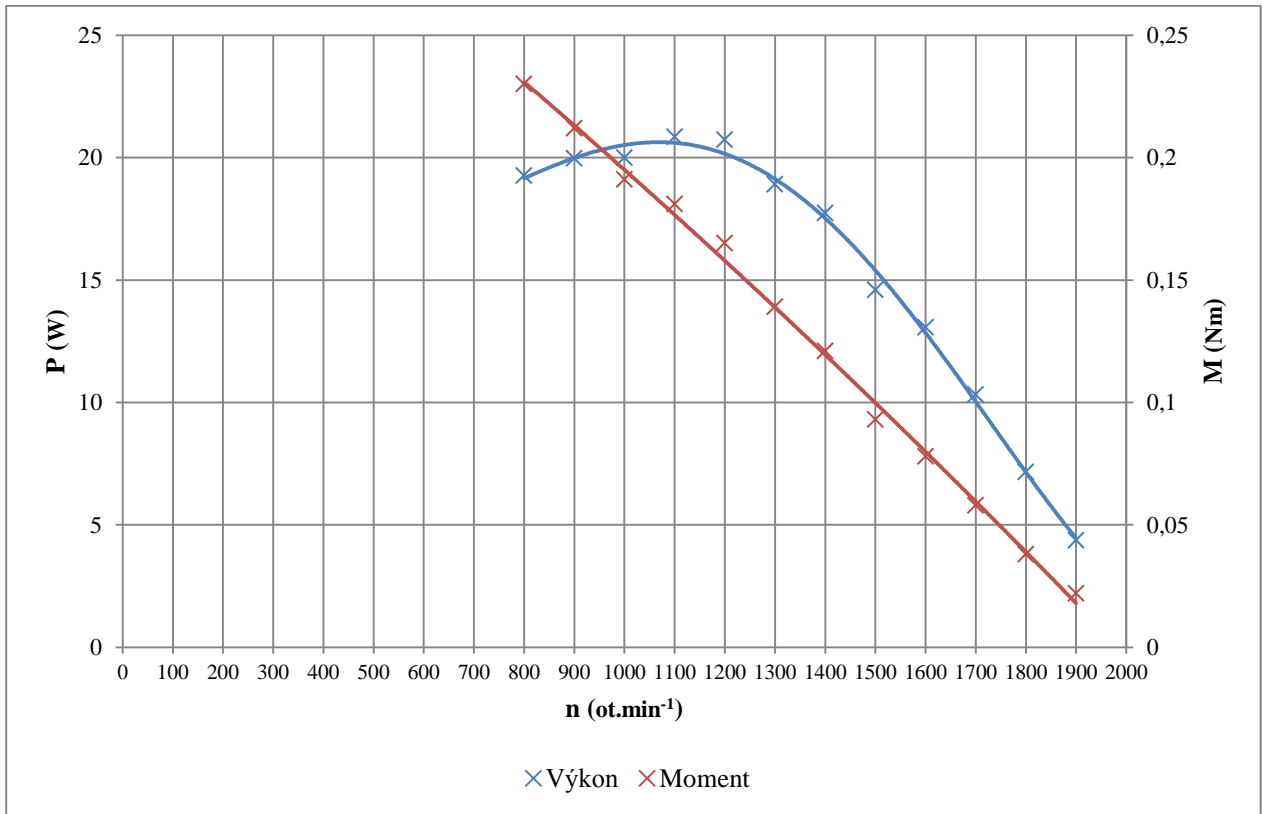
$$\eta_t = \frac{P}{9,81 \cdot H \cdot Q} = \frac{20,84 \text{ W}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 3,17 \text{ m} \cdot 1,28 \text{ l. s}^{-1}} = 0,5236 \quad (8.29.)$$

Při uvažování mechanických ztrát lze celkový výkon vypočítat pomocí vztahu

$$P = P_t + \Delta P_{mech} = 20,84 \text{ W} + 8,3 \text{ W} = 29,14 \text{ W} \quad (8.30.)$$

Dle vzorce 8.28 nyní vypočítám účinnost turbíny s uvažováním mechanických ztrát

$$\eta_t = \frac{P}{9,81 \cdot H \cdot Q} = \frac{29,14 \text{ W}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 3,17 \text{ m} \cdot 1,28 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}} = 0,73 \quad (8.31.)$$



Obr. 39: Grafická závislost výkonu a momentu na otáčkách

9 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit funkční model malé vodní elektrárny, který by sloužil pro školní účely jako názorná ukázka funkce vodní elektrárny, eventuálně pro využití v laboratorní výuce a popřípadě pro testování zkratové odolnosti. Výsledkem je funkční model, který lze používat.

Pro pohon malé vodní elektrárny se rozhodovalo mezi dvěma typy turbín a to Bánkiho a Peltonovou. Nakonec byla zvolena turbína typu Bánki, protože je konstrukčně jednodušší a pro spojení turbíny s alternátorem nebylo zapotřebí použít spojku, která by snížila účinnost celého modelu. Turbína byla navržena pro spád 3 m a pro průtok $3,3 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Při těchto parametrech by měla dosahovat výkonu 58 W s uvažováním účinnosti 0,6 a při jmenovitých otáčkách 1123 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Po vypočtení jednotlivých parametrů jsem přistoupil k vytvoření 3D modelu prostřednictvím programu Autodesk Inventor 2013 a pomocí tohoto modelu došlo k vytvoření prototypu díky 3D tiskárně. Pro uchycení turbíny s hřídelí, jejíž průměr byl vypočítán na hodnotu 8 mm, bylo využito tzv. červíků, kteří se pomocí závitů, které byly vytvořeny v turbíně, zařídili do hřídele.

Následovalo vytvoření „boxu“ z plexiskla pro uložení turbíny o tloušťce 1 mm. Tento box plní hlavní funkci a tou je zabránění úniku vody mimo kryt. U boxu bylo zapotřebí zajistit velkou přesnost jednotlivých dílů kvůli osově rovnosti, protože se také v boxu nacházejí ložiska a gufera a při nedodržení osově rovnosti by docházelo k odírání turbíny o stěny krytu a docházelo by k snižování otáček. Součástí krytu je také přivaděč vody na turbínu, kterému byla věnována speciální pozornost, a proto byl vytvořen hydraulický výpočet. Tato součást plní dvojí funkci, první z nich je urychlování vodního toku a druhou je nasměrování vody pod správným úhlem na turbínu. Součástí je také projekt sací trouby, která slouží k zužitkování odpadní vody z turbíny, kde dochází k vytvoření podtlaku a tento podtlak přispívá k zlepšení funkce turbíny.

Okruh vody byl vytvořen pomocí vodovodního potrubí o průměru 32 mm, který je vybaven kulovým ventilem. Ten je doplněn průtokoměrem, kterým lze snímat procházející průtok vodním potrubím. Pro zaručení nepřetržitého provozu modelu při sepnutém čerpadle byl jako zásobárna vodního média použit sud o velikosti 200 l. Voda současně slouží k chlazení ponořeného čerpadla.

Pro přeměnu mechanické energie na elektrickou byl vybrán alternátor od společnosti Magnetron typu 9513021, jehož maximální proud je 55A. Tento generátor byl vybrán kvůli možným zkouškám zkratové odolnosti celého systému. Pro uchycení byl vytvořen prototyp, kterým je alternátor připevněn do konstrukce malé vodní elektrárny.

Po zprovoznění modelu vodní elektrárny bylo provedeno měření pomocí dynamometru. První měření bylo provedeno ke zjištění mechanických ztrát turbíny. Při nominálních otáčkách 1100 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ byly změřeny mechanické ztráty 8,3 W. Při nominálním zatížení pomocí dynamometru dosahovala turbína výkonu 20,83 W a její účinnost byla spočítána na hodnotu 52 %. Při uvažování mechanických ztrát vyšla účinnost 73 %. Při měření výkonu na generátoru byl změřen výstupní výkon 10 W, proto lze říci, že mechanické ztráty alternátoru činí přibližně 10 W. Nutno poznamenat, že turbína nedosahuje navrženého výkonu 58 W.

Při hlubším zkoumání bylo zjištěno, že čerpadlo nepracuje podle čerpadlové charakteristiky, která je udávaná výrobcem. Při měření dodávaného průtoku pomocí čerpadla do měřicí nádoby, do které jsme napouštěli 15 l vody a naměřili čas pro spád okolo 0,5 m, vyšel průtok k hodnotě $2,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, přičemž výrobce udává při takovém spádu průtok $4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnota naměřená a udávaná od výrobce se tedy liší o 37,5 %. Pokud budu uvažovat, že navrhovaný průtok bude snížen o hodnotu 37,5 %, výsledný průtok by měl dosahovat hodnoty $2,06 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Při reálném měření však byla hodnota průtoku změřena $1,27 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento pokles může být způsoben koeficienty odporu potrubí a kulového ventilu. Za velkou část poklesu výkonu odpovídá čerpadlo, které nedodává potřebný průtok, který byl stanoven v čerpadlové charakteristice výrobce.

I když model nedosahuje stanovený výkon je plně funkční a lze jej použít pro požadované operace, které byly vyžadovány. Pro získání požadovaných parametrů bude nutná optimalizace modelu. Další možnou modifikací tohoto modelu je tloušťka stěny vodovodního potrubí. Pro tento návrh bylo použito polypropylenové (PPR) potrubí o průměru 32 mm o tlakové řadě PN16, která má světlost 23 mm. V případě použití plastového potrubí PPR o průměru 40 mm o tlakové řadě PN10, která má světlost 32,6 mm, dojde k zvětšení plochy pro průchod vody a při použití této trubky dojde k zvýšení průtoku přibližně dvojnásobně. Důsledkem bude zvýšení vyráběného výkonu a turbína bude dosahovat větší účinnosti. Při použití trubky o průměru 40 mm bude nutné vyměnit současně kulový ventil a průtokoměr. Popřípadě lze výkon modelu v budoucnu zvýšit pomocí kvalitního čerpadla, které bude schopno dodávat požadovaný nebo i vyšší průtok.

POUŽITÁ LITERATURA

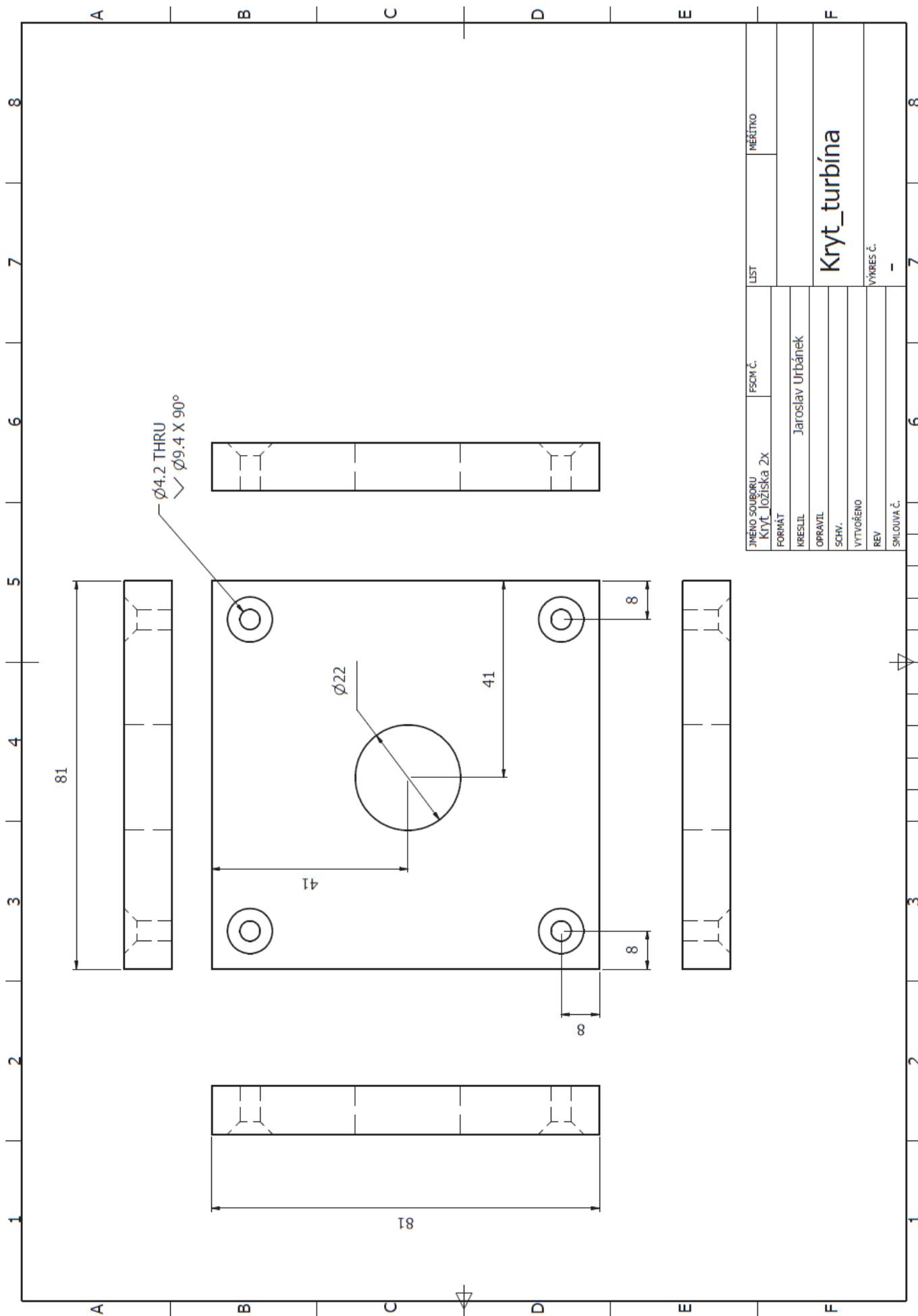
- [1] MELICHAR, J., J. VOJTEK a J. BLÁHA. *Malé vodní turbíny: Konstrukce a provoz*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-0101808-0.
- [2] Bánkiho turbína. *Malé vodní elektrárny* [online]. 2009 [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [3] HOLATA, Miroslav. *MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY: Projektování a provoz*. Praha 2: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [4] Turbína: Francisova turbína. *Wikipedia* [online]. 21.3.2014 [cit. 2014-12-23]. Dostupné z: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Turb%C3%ADna#mediaviewer/File:Laufrad-Soesetalsperre.jpg>
- [5] *Energyweb: Cesta k turbínám* [online]. 2010 [cit. 2014-12-23]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=4.1.2
- [6] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny*. 1989. vyd. Praha: Technické leiteratury, 1989. ISBN 621.311.21-181.4.
- [7] MVE.Energetika. *Malá voda* [online]. 2001 [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [8] MATOUŠEK, Antonín. *Elektrárny 1*. Brno: VUT FEKT, 2002. ISBN 80-214-2269-6
- [9] EVA. *Čerpadlo Elpumps CT4274* [online]. 2014 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <https://www.eva.cz/zbozi/56020/cerpadlo-kalove-elpumps-ct-4274/>
- [10] Konstrukce. *Marek Industrial a.s.* [online]. 2006 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.marek.eu/cz/produkty/hlinikove-profilky-konstrukce-dopluky-b-fm-systeme-b-fath/hlinikove-konstrukcni-profilky-b-fm-systeme-b/>
- [11] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny: Jejich konstrukce a příslušenství*. Praha: Statní nakladatelství technické literatury, 1962. ISBN 4337922748.
- [12] NI USB 6210. *National Instruments* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/203223>
- [13] HALUZA, M. *Přednášky předmětu Tekutinové stroje I.a II.*
- [14] Jednofázový asynchronní motor napájen pomocí měniče. 2014. In: *Frekvenční měnič* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/cz/U12110/vyzkum/Zeliv08/cd/EL/Zeliv_EL_01.pdf
- [15] Invertek CZ. 2015. *Frekvenční měnič* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.invertek.cz/produkty/2-optidrive-e2-ip20.htm>
- [16] FyzWeb. 2014. *Točivý moment* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/materialy/sily/moment/podr.php>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A – ROZMĚRY KRYTU TYRBÍNY	56
PŘÍLOHA B – TECHNICKÁ DOKUMENTACE PŘIDADĚČE	64
PŘÍLOHA C – ROZMĚRY PRO BOX ALTERNÁTORU	67
PŘÍLOHA D – ROZKRESLENÍ STOLKU PRO MALOU VODNÍ LEKTRÁRNU	71

PŘÍLOHA A

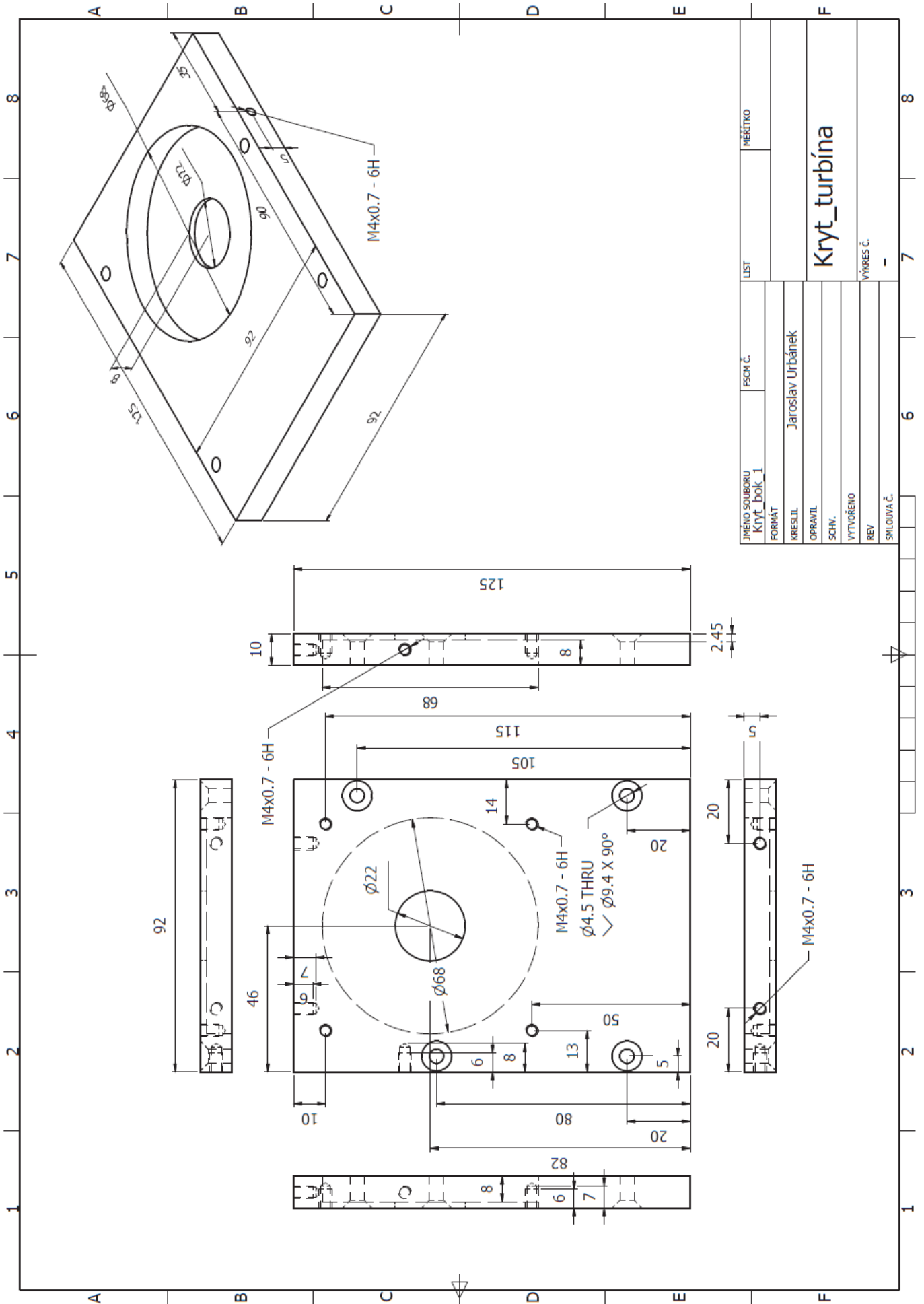
Jednotlivé výkresy součástí pro kryt turbíny.

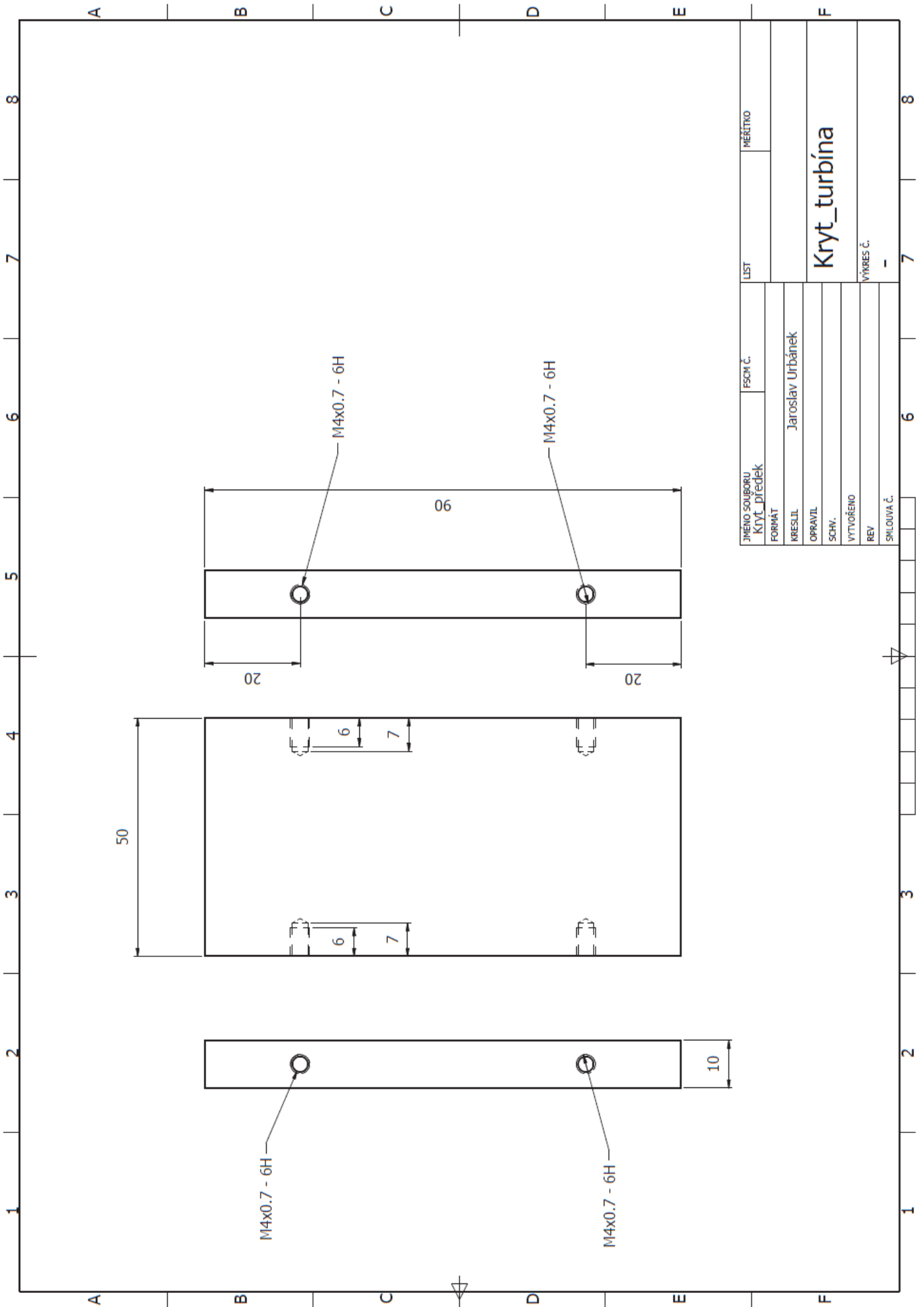


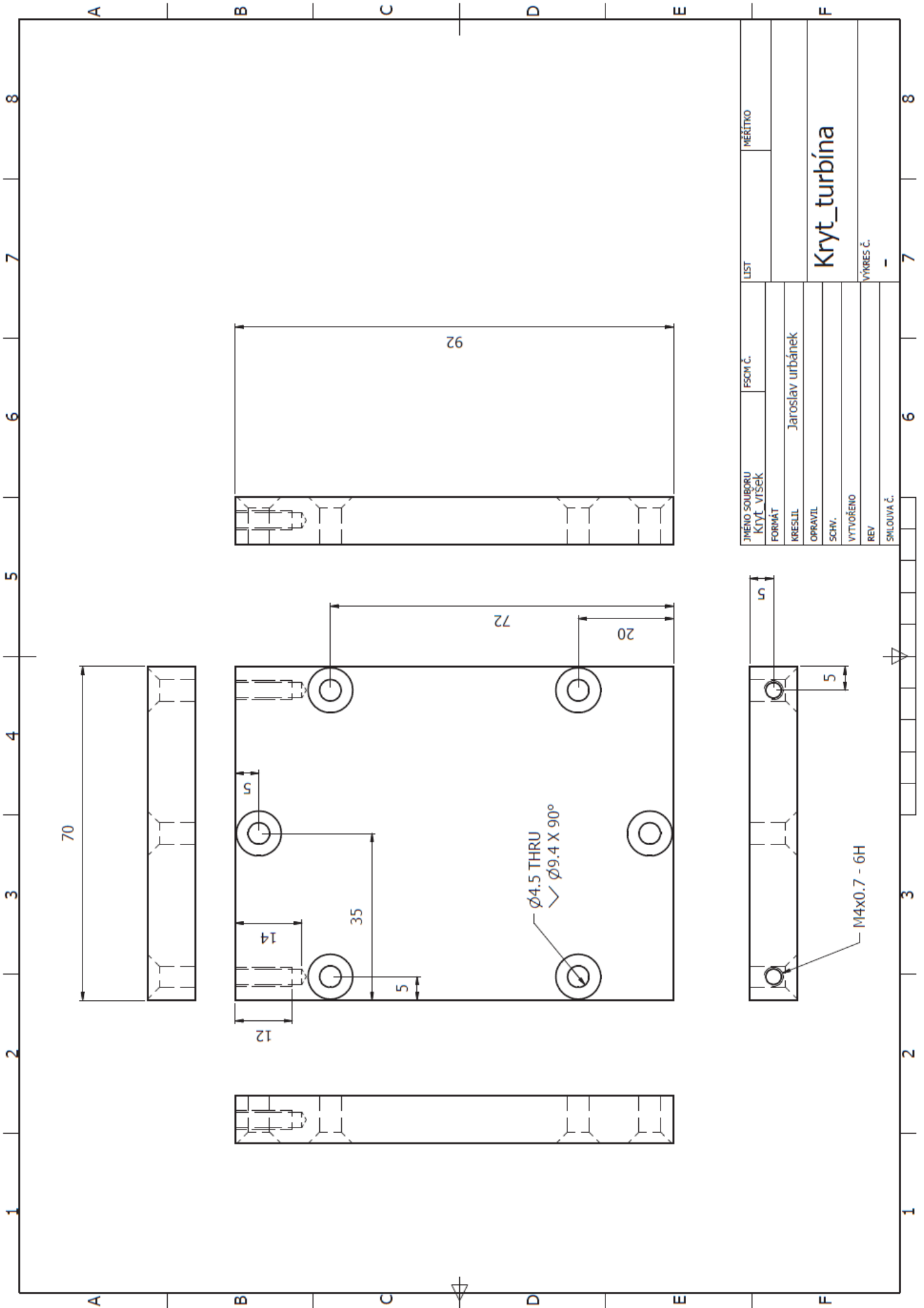
JMÉNO SOUBORU KRYT_I0ZISKA_2X	LIST	MĚŘÍTKO
FORMÁT		
KRESLIL Jaroslav Urbánek		
OPRAVIL		
SCHV.		
VYTVOŘENO		
REV		
SPLOUVA Č.	-	

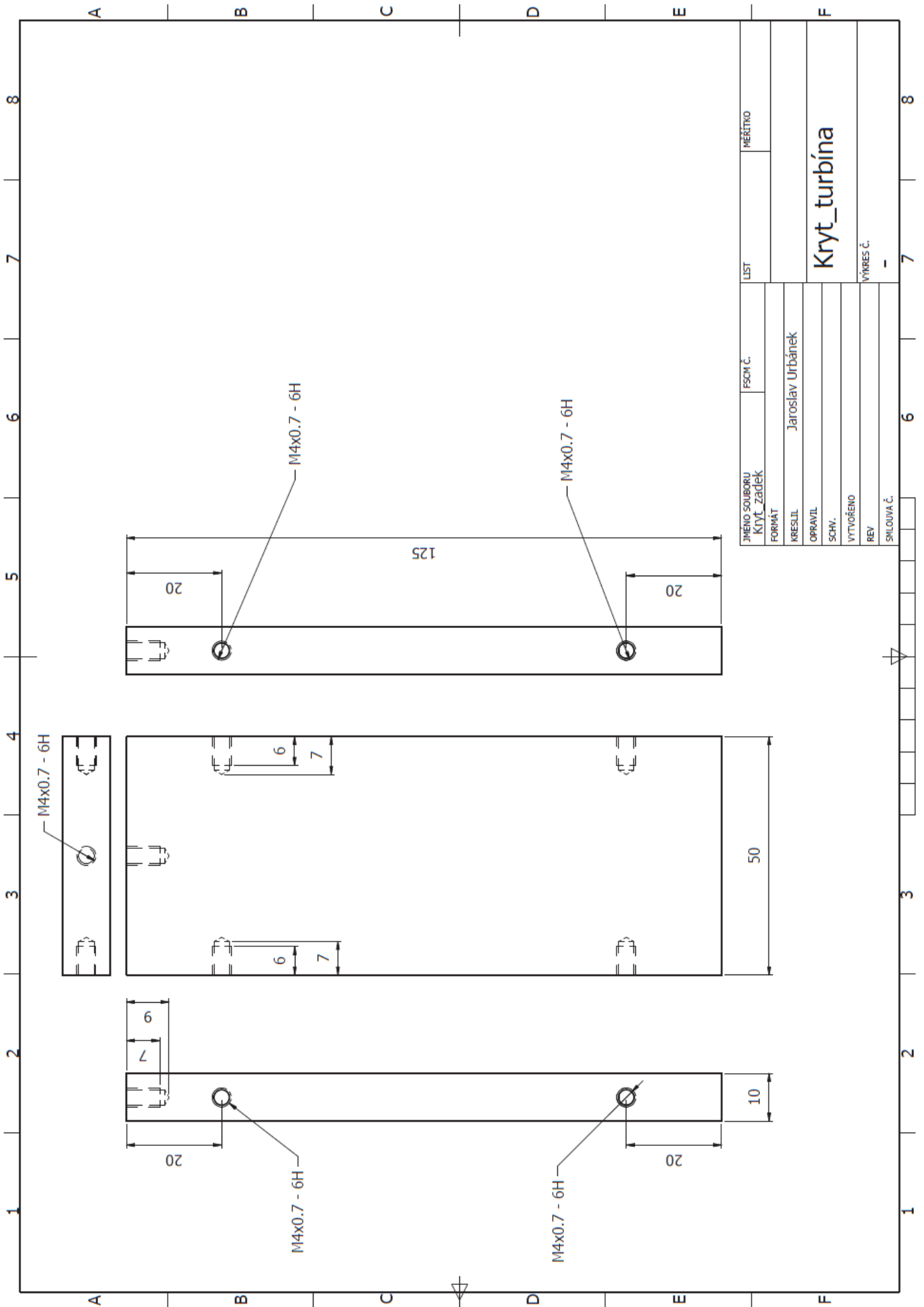
Kryt turbína

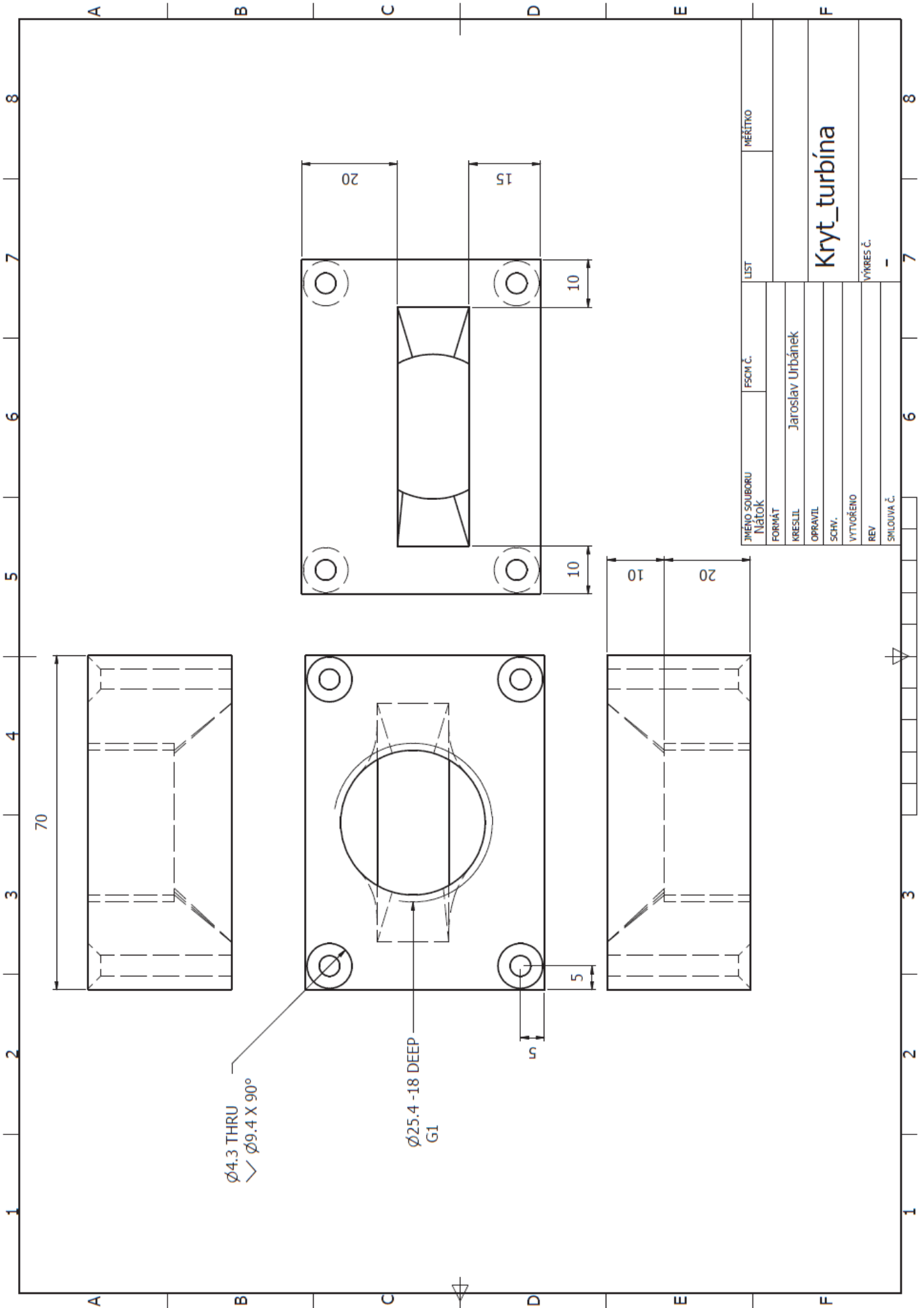












JMÉNO SOUBORU NÁZEV	FORM. Č.	LIST	MĚŘÍTKO
FORMÁT	Jaroslav Urbánek		
KRESLIL			
OPRAVIL			
SCHV.			
VYTVOŘENO			
REV			
SPLOUVA Č.			

Kryt turbína

VÝKRES Č.

-

8

7

6

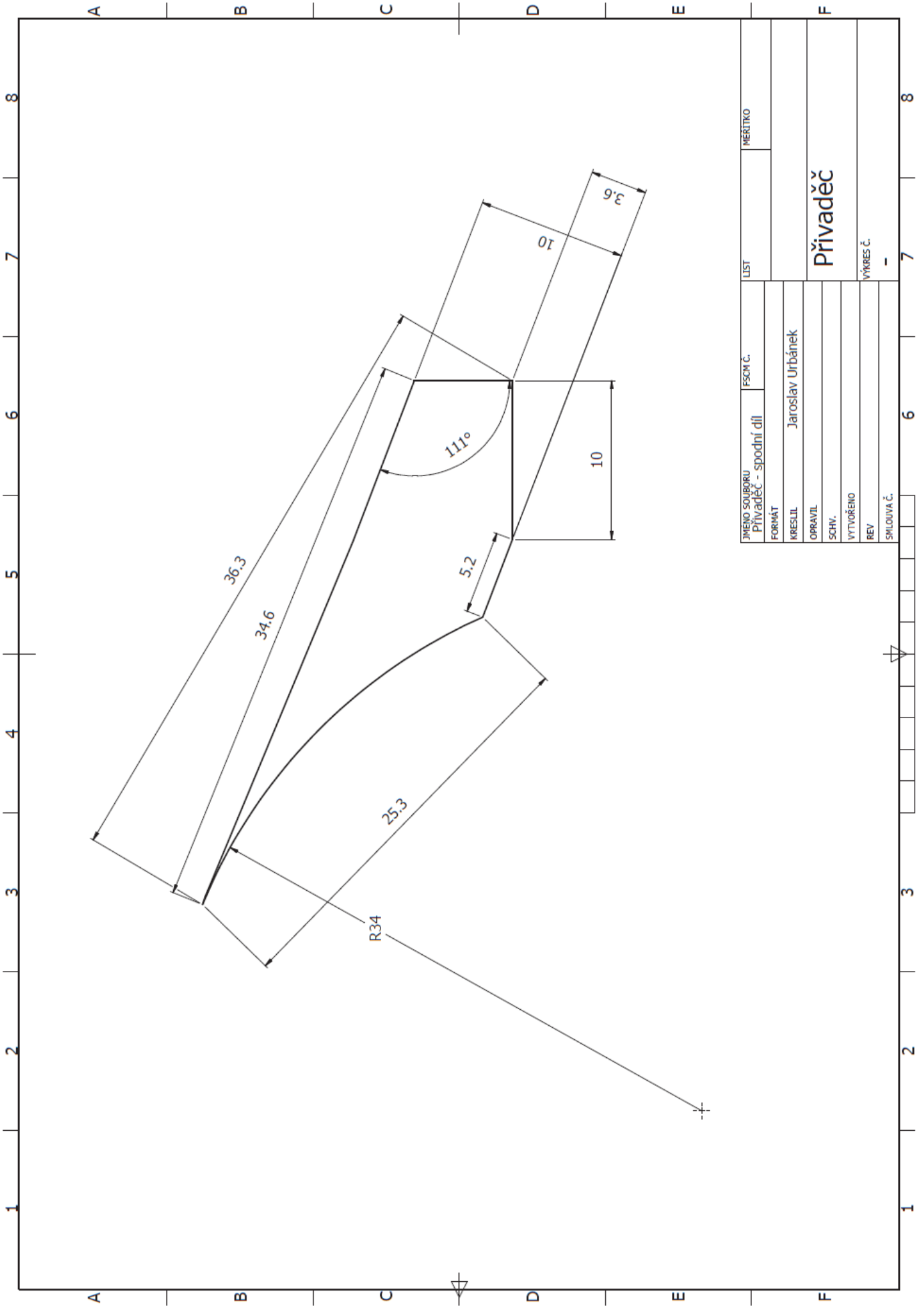
3

2

1

PŘÍLOHA B

Rozměry přivaděče vody na turbínu.



JMÉNO SOUBĚRU	LIST	MĚŘÍTKO
Přívaděč - spodní díl		
FORMÁT	FSCM Č.	
KRESLIL	Jaroslav Urbánek	
OPRAVIL		
SCHV.		
VYTVOŘENO		
REV		
SMĚLOUVA Č.		

Přívaděč

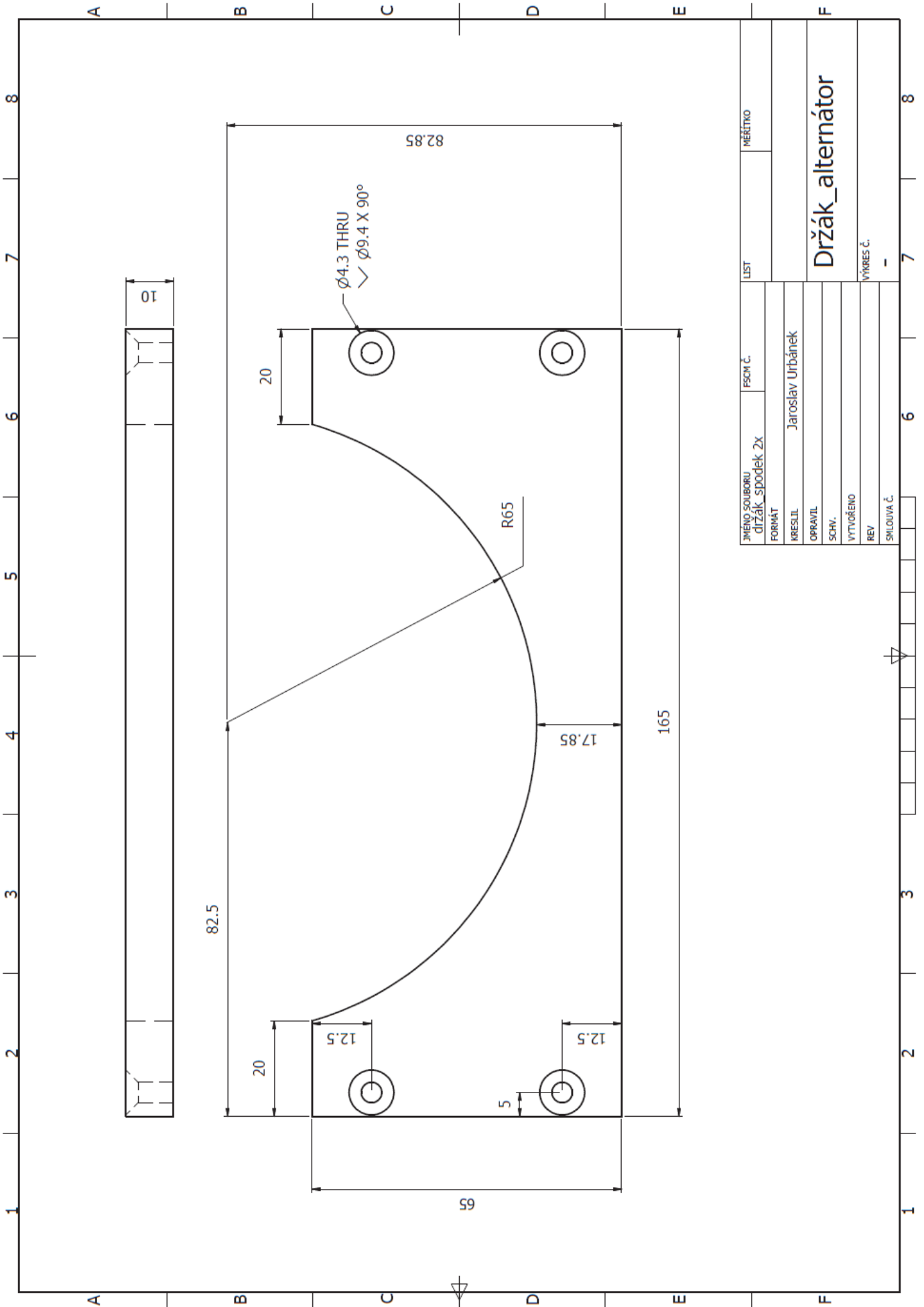
VÝKRES Č.

-



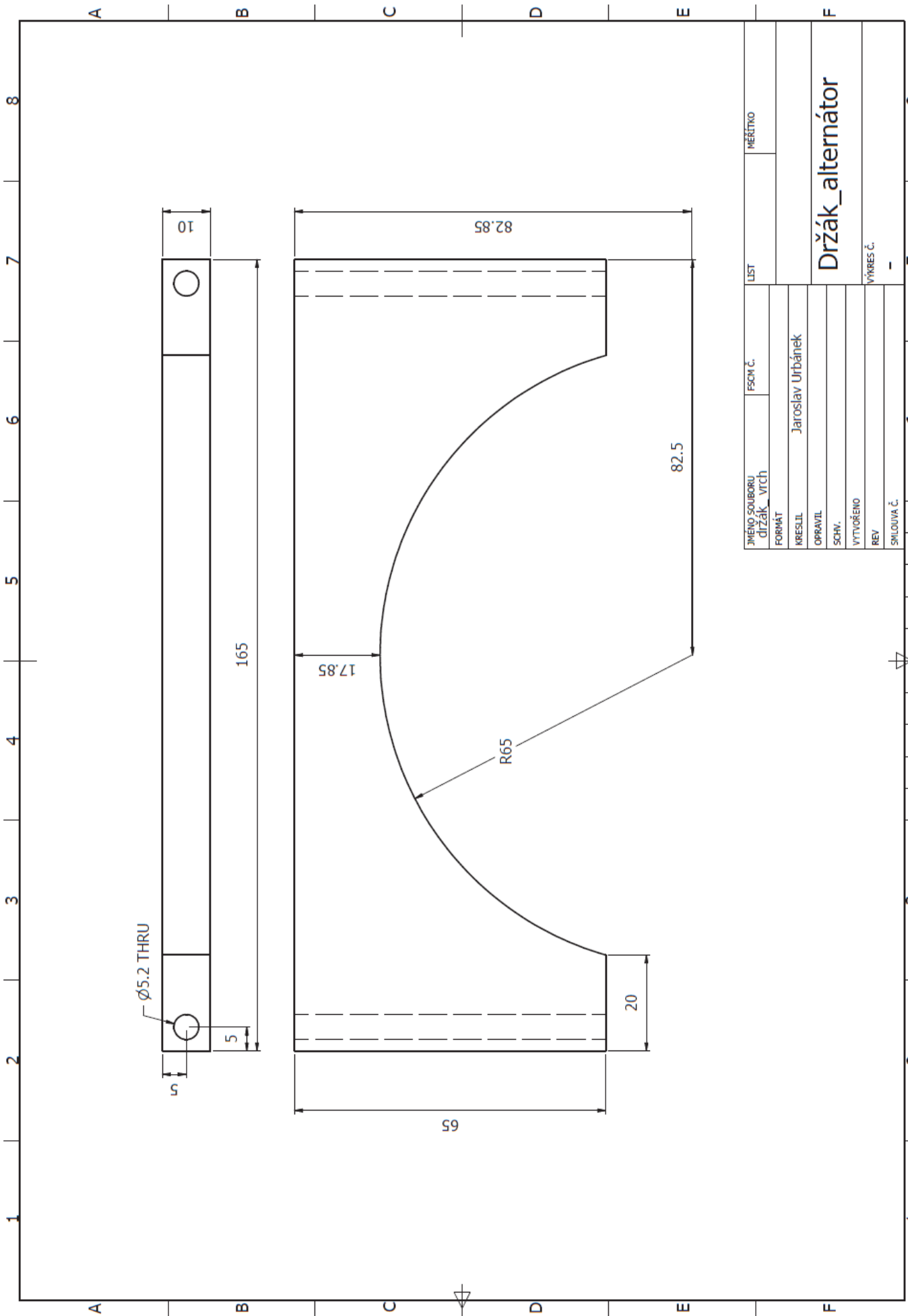
PŘÍLOHA C

Rozměry jednotlivých dílu pro držák alternátoru.



JMÉNO SOUBORU	FORMÁT	FORM. Č.	LIST	MĚŘÍTKO
Držák_SPODEK 2X				
KRESLIL	Jaroslav Urbánek			
OPRAVIL				
SCHV.				
VYTVOŘENO				
REV				
SKLOUVA Č.	-			
VÝKRES Č.			7	8

Držák alternátor



JMÉNO SOUBORU držák_vrch	LIST	MEŘÍTKO
FORMÁT	FSOM Č.	
KRESLIL	Jaroslav Urbánek	
OPRAVIL		
SCHV.		
VTVŮŘENO		
REV	VYKRES Č.	
SKLOUVA Č.	-	

Držák_alternátor



PŘÍLOHA D

Zakreslené rozměry pracovního stolku pro model malé vodní elektrárny.

