

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Хидрауличне и пнеуматске машине

Број индекса: 709/2013

Милан Р. Срејић

**Пројекат лабораторијско-експлоатационог модела
Банки турбине
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Др Милун Бабић, редовни проф. -ментор**
- 2. Др Вања Шуштершич, ванр. проф**
- 3. Др Слободан Савић, ванр. проф.**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

СПИСАК СЛИКА:

- Слика 1. Мала хидроелектрана
- Слика 2. Шема МХЕ за велики пад
- Слика 3. Шема МХЕ за мали пад
- Слика 4. Цевовод
- Слика 5. Препоруке за избор турбина
- Слика 6. Кавитација на пропелеру
- Слика 7. Банки-Мичел-Осбергова турбина
- Слика 8. Шематски приказ цевовода и постројења
- Слика 9. Карактеристика турбинског постројења
- Слика 10. Троуглови брзина у радном колу "Банкијеве" турбине
- Слика 11. Профилисање лопатица
- Слика 12. Модел радног кола, обртног вратила и клина
- Слика 13. Модел склопа радног кола
- Слика 14. Млазница
- Слика 15. Горњи поклопац кућишта са млазницом, кућиштем за лежај и лежајем
- Слика 16. Модел Банки турбине
- Слика 17. Карактеристике цевовода, турбине и степена корисности
- Слика 18. Електрични генератор
- Слика 19. Спојница
- Слика 20. Постоље турбинског постројења
- Слика 21. Држач-прихватник обртног вратила
- Слика 22. Запорни вентил
- Слика 23. Турбинско постројење
- Слика 24. Механичко-хидраулички механизам са замајцем
- Слике 25. до 29. Објекат турбинског постројења са позицијама опреме и
- Слика 30. Направљени модел Банки турбине
- Слика 31. Направљени модел радног кола
- Слика 32. Направљено кућиште са радним колом
- Слика 33. Направљен поклопац са млазницом

СПИСАК ТАБЕЛА:

- Табела 1. Подела турбина према паду
- Табела 2. Полазне величине и параметри
- Табела 3. Структура цевовода по деоницама
- Табела 4. Обрада и материјали коришћени за прототип "Банки турбине"
- Табела 5. Цана цевовода према деоницама и компонентама
- Табела 6. Подстицајне цене ел. енергије за повлашћене произвођаче из обновљивих извора енергије

Резиме:

У овом раду је извршена анализа прорачуна потребних за конструисање турбинског постројења, које је израђено коришћењем Банки турбине. Извршено је и димензионисање цевовода за довод воде од водозавода до самог турбинског постројења, прорачун и конструисање турбине, прорачун губитака, као и израда 3Д модела.

Кључне речи: Банки турбина, вода, притисак и 3D модела.

Abstract:

In this study we analyzed the budget needed for the construction of the turbine plant, which is made using Banks turbine. Was performed and dimensioning of pipelines for water supply from the water intake to the turbine plant, calculation and construction of the turbine, calculation of losses, as well as making 3D models.

Key words: Banks turbine, water, pressure and 3D models.

САДРЖАЈ

1. УВОД	7
1.1 Улога компјутера у дизајнирању и конструисању МХЕ.....	8
1.2 Компјутерско конструисање МХЕ	10
1.3 Значај компјутера за израду МХЕ	11
2. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ О МАЛИМ ХИДРОЕЛЕКТРАНАМА - САСТАВНИ ДЕЛОВИ И КАРАКТЕРИСТИКЕ	12
2.1. Класификација малих хидроелектрана	14
2.2. Саставни делови система МХЕ	16
2.3. Акцијске турбине типови и избор	18
2.4. Кавитација	19
3. БАНКИ ТУРБИНЕ	21
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТУРБИНСКОГ ПОСТРОЈЕЊА	23
4.1 Одређивање оптималних хидрауличних параметара постројења	28
4.2 Одређивање оптималних параметара турбине.....	30
4.3 Израда електронског 3Д модела Банкијеве турбине	32
4.4 Кратак осврт на принципе регулисања броја обртаја Банкијеве турбине	43
5. ПРИКАЗ ПОСТУПКА ИЗРАДЕ, МОНТАЖЕ И ОДРЖАВАЊА БАНКИЈЕВЕ ТУРБИНЕ КОЈА ЈЕ РАЗВИЈЕНА У ОКВИРУ ЗАВРШНОГ РАДА.....	48
5.1 Кратак приказ изведене конструкције	48
5.2 Коришћени материјали.....	50
5.3 Упутство за пуштање у рад турбине и за одржавање.....	51
6. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА ПРОЈЕКТА И РЕАЛИЗАЦИЈЕ	52
Уредбом Владе Републике Србије о мерама подстицаја за повлашћене произвођаче електричне енергије, која се примењује од 1. јануара 2014. године, утврђене су подстицајне цене, које су дате у следећој табели 5.:	
- Сходно Уредби Владе РС и инсталисаној снази наше хидро-електране загарантована откупна цена је.....	12,40 с€/kWh = 0,124 €/kWh
- Трошкови ангажовања 3 запослена на непрекидном двадесетчетворочасовном дежурству на месечном нивоу износе.....	3 x 350€ = 1.050 €/mesec
- Исти трошкови по часу износе.....	(1.050 €/mesec : 30) : 24 = 1,46 €/h
- Једночасовни приход од производње електричне енергије биће.....	2,345 €/h
7. ЗАКЉУЧАК	56
8. ЛИТЕРАТУРА.....	57

Наслов теме завршног рада: **Пројекат лабораторијско-
експлоатационог модела Банки турбине**

Циљ овог завршног рада је реализација пројеката и израда лабораторијско-експлоатационог модела Банки турбине.

Ослањајући се на резултате семинарског рада из Хидрауличних и пнеуматских машина који је радио у оквиру студентског пројектног тима и на своје тада остварене резултате, студент Милан Срејић треба да у оквиру свог завршног рада:

1. уведе читаоца у конструкцијска извођења, принципе дејства и прорачуна Банки турбина,
2. изложи енергетске параметре локација у којима Банки турбине раде са највишим степенима корисног дејства,
3. опише методологију, прикаже функционалне шеме и структурне елементе система за регулисање броја обртаја Банки турбина,
4. пројектује и изради недостајуће делове постојећег лабораторијско-експлоатационог модела Банки турбине,
5. прорачуна енергетске параметре објекта из тачке 4.,
6. припреми упутство за уградњу и коришћење објекта из тачке 4.,
7. уради техноекономску анализу која ће дефинисати цену објекта из тачке 4., цену његове уградње, и време повраћаја уложених средстава,
8. изнесе одговарајуће закључке.

У Крагујевцу, 16. 06.2014. године

Предметни наставник

Проф. др инж. Милун Ј. Бабић

1.УВОД

Водовод је врста цевовода која служи за транспорт пијаће воде. Први водоводи тј. акведуки, настали су у доба Римљана пре око два миленијума, док су у Кини први такви сазидани око 200. године пне.¹ Данас је водовод главни вид транспорта воде и не може се замислити ниједно насеље које нема саграђену мрежу подземних цеви овакве намене

Снагу воде човек користи већ више од 2 миленијума. Водена енергија коришћена у механичком облику, помоћу разних зупчаника или каишева покретала је млинове, пилане и радионице, доносила је просперитет и развој. Са њим је коришћење енергије воде добило ново лице. Крајем 19. и почетком 20. века биле су конструисане прве водене турбине.² Постепено су велики централни ресурси енергије потисли скоро све локалне. Ипак, данас, размишљајући о свим врстама „зелене“ или „еко“ енергије, заправо она водена, од мини хидроелектрана, има највећи значај.

Мини, или мале, водне електране, као обновљиви ресурс, могу претстављати значајни допунски ресурс електричне енергије једне државе. (Држава може имати своју стратегију за велике хидроелектране, али мале ХЕ су, у односу на велике, ресурс толико различит, да се развој ове гране може разматрати сасвим одвојено.) Од свих алтернативних извора електричне енергије заправо мале хидроелектране играју у европским земљама највећу улогу. Средства потребна за њихову изградњу су релативно мала, а неупоредиво мање су и интервенције на природни амбијент земље. Оне не захтевају неопходно изградњу акумулације, не утичу битно на ниво подземне воде и микроклиме. Свеукупни хидроенергетски потенцијал за мале хидроелектране у свету износи око 180 GW.³

У Европској унији (ЕУ) (којој и ми тежимо) има више од 17.400 малих хидроелектрана са укупном инсталисаном снагом од 11.000 MW. То су оне које производе мање од 10 MW – овај лимит за назив „мала“ (МХЕ) је признат, такође, од Европске асоцијације за мале хидроелектране ESHA. Земље, које су до сада највише искористиле свој потенцијал, су Италија, Француска и Шпанија. Међу најактивније земље на овом пољу спадају Немачка, Шпанија и Грчка. Занимљиво је приметити да Норвешка више од 99% потреба за електричном енергијом задовољава из енергије воде, с тим да још 25 светских држава зависе од енергије воде више од 90%. Укупно више од 60 земаља у свету користи хидроенергију за више од 50% својих потреба за електричном енергијом. У

¹ <http://sr.wikipedia.org/srВодовод>

² <http://sr.wikipedia.org/srхидрауличне> турбине

³ <http://www.obnovljivi.com/energija-vode/55-iskoristavanje-energije-vodotoka-u-energetici>

Србији, за сада, степен искоришћености оваквог потенцијала је низак. Претпостављени животни век електране може бити и 100 година. У земљама ЕУ, где су електране најстарије, 45% постројења је старијих од 60, а 68% старијих од 40 година.⁴

1.1 Улога компјутера у дизајнирању и конструисању МХЕ

Човекова креативна делатност коју развија да би боље организовао и обликовао физички и духовни свет, назива се дизајном.⁵ **Дизајн** се примењује на обликовање свих употребних предмета или објеката, од оног тренутка када су први пут и настали, без обзира од кога су материјала и коју намену имају. Савременим дизајном сматра се обликовање предмета, производа и амбијента у оном тренутку када настају, односно када се, упоредо са настајањем дизајнирају⁶.

Рад на дизајну МХЕ, слично као и дизајн свих осталих производа, вишеструко је олакшан и данас је незамислив без примене рачунара. У процесу дизајнирања најпре се креће од цртежа, односно визуелне презентације идеје дизајнера. Тако је, на пример, у аутомобилској индустрији где тимови стручњака као иницијалну идеју и пројектни задатак добију само цртеж аутомобила који тек треба производити. Ти цртежи могу бити пиктурални (каросерија аутомобила, нпр.) и технички, са већ формираним или задатим техничким подацима. Најчешће се користе комбиновано. Такви цртежи имали су примену и пре рачунара, а тада су рађени ручно. Тада је до посебног изражаја долазила креативност дизајнера - конструктора, често на граници уметничке, а појавом рачунара креативност није изгубљена. У многим сегментима је појачана, с тим да квалитет цртежа урађених на рачунару не зависи само од креативности дизајнера - конструктора, него и од перформанси рачунара који се користи.

Од пројектаната и конструктора МХЕ, осим иновативности и сталног прилагођавање конструкције новим захтевима, очекује се и битно скраћење рокова за израду нових пројеката. Скраћење рокова, међутим, не подразумева и слабији квалитет, напротив. Нове идеје, краћи рокови и већи квалитет неопходан су одговор на захтеве интензивног технолошког развоја и захтеве тржишта.

Процес дизајнирања састоји се из две фазе.⁷

Прва фаза везана је за појаву потребе за одређеним дизајном, односно, одређеним производом који је потребно дизајнирати - конструисати. Намена и функција тог

⁴ http://www.fmz.edu.rs/pages/05_arhiva/simpozijum/download/1_snrm_2011_zbornik.pdf

⁵ <http://www.tehnickaue.edu.rs/srp/cas/?conid=2319>

⁶ <http://www.tehnickaue.edu.rs/srp/cas/?conid=2319>

⁷ <http://www.dgt.uns.ac.rs/zbornik/issue41/32%20Prikaz%20Ivkov.pdf>

производа - део су идеје и процеса конструисања. У оквиру прве фазе врши се и истраживање тржишта.

Друга фаза је техничка и односи се на материјално-производну област, којом се производу обезбеђује исправно функционисање.

Дизајнирање, као процес, састоји се и од ергономске и естетске компоненте.⁸

Ергономска компонента подразумева избор најбољих решења психофизичког односа између производа и корисника.

Естетска компонента тиче се форме производа. При дефинисању естетске компоненте постављају се одређени предуслови, али њима се не лимитира нити ограничава креативност.

То се као квалитет посебно уочава код производа исте намене, али различитог степена креативности који је примењен у креирању тих производа.

Естетска компонента посебно је значајна и уочљива у дизајну текстила, као и код свих производа из домена декоративног дизајна. Насупрот овој врсти дизајна, код конструкције комбајна, на пример, или других радних машина, декоративност није на првом месту. У овој групи - много је значајнија функционална и ергономска компонента, што не значи да у њиховом креирању треба запоставити естетску компоненту. Дизајн зато и јесте интердисциплинаран процес. Код дизајнирања занатске производње (столари, ткаље, мајстори...) уобичајено је да мајстор сам дизајнира свој производ. Али, код дизајнирања у индустријској производњи - неопходан је заједнички рад мултидисциплинарних тимова. У ту сврху формирају се тимови дизајнера, у чијем су саставу профили разних специјалности: за истраживање тржишта, технолози, конструктори, економисти, индустријски социолози итд.

Кључна личност у таквим тимовима је **конструктор-дизајнер**. Он је у процесу конструисања укључен од почетка до краја и, по правилу, доноси коначне одлуке, консултујући остале чланове тима дизајнера. Током таквих, стваралачких процеса, врло често настају и потпуно оригинални производи који се први пут појављују на тржишту, што и јесте циљ сваке производње која треба да постане економски исплатива.

Оригиналност неког производа установљава се, пре свега, по његовом дизајну, примени, иновативности...

⁸ <ftp://is.fin.kg.ac.rs/Arhiva/radovi/5059.pdf>

1.2 Компјутерско конструисање МХЕ

Савремена методологија конструисања захтева испуњење следећих циљева⁹:

- повећање квалитета пројектних решења,
- краће време пројектовања,
- смањење трошкова пројектовања,
- генерисање више решења,
- графичку презентацију тока и резултата пројектовања,
- побољшање тока и поузданости информација,
- повећање продуктивности и квалитета рада пројектаната и
- растерећење пројектанта од рутинских послова.

За остварење набројаних циљева, концепција програмске подршке заснива се на¹⁰:

- 1) модуларној структури,
- 2) нумеричкој и графичкој обради података и
- 3) интерактивном раду.

Додатна графичка обрада података потребна је само у неким модулима пакета, да би се омогућили визуелни прегледи тока пројектовања.

Нумеричка обрада података подразумева различите врсте прорачуна.

Интерактивни рад подразумева комуникацију пројектанта и програмског пакета.

Овакав начин рада допушта једноставно мењање пројектних података и параметара, што омогућава упоредну израду алтернативних решења.

Машински систем се пројектује тимски, по специјалностима. Циљ је да се идеје постепено трансформишу у структуру, тј. у скуп функционално повезаних делова и компонената. Заједнички циљ свих учесника у пројекту је да се дође до скупа могућих решења из кога се бира оптимално решење.

При конципирању идејног решења треба се руководити следећим принципима:¹¹

- 1) анализирати сличне, већ изведене конструкције и машинске системе,

⁹ <http://www.tehnicka.edu.rs/vanredno-skolovanje/492.html>

¹⁰ <http://www.tehnicka.edu.rs/vanredno-skolovanje/obrazovni-profili/492.html>

¹¹ <http://www.tehnickaue.edu.rs/srp/cas/?conid=2322>

- 2) користити аналогіје и теоріју сличности,
- 3) користити методику проналажења нових идеја и
- 4) користити інтуїцію.

Општи захтеви конструкције решавају се приликом пројектовања а то су : функција, ефикасност, поузданост, технологичност, економичност, естетски захтеви конструкције , као и низ ограничења која такође морају бити задовољена. Решавање овако постављеног пројекта у општем случају могуће је оформити у облику већег броја варијантних решења.

1.3 Значај компјутера за израду МХЕ

Недостижна предност рачунара у односу на класичну технику цртања је могућност 3D презентације, која код класичних цртежа не постоји.

Рачунарски CAD (Computer Aided Design - конструисање помоћу рачунара) систем користи специфичне програме, као што су IDEAS, Pro-ENGINEER, CATIA MICROCADAM Helix, SOLIDWORKS, INVENTOR и сл., уз одговарајући рачунар и пратећу опрему.

Уз овакве програме могу се конструисати флексибилни модели, чија се флексибилност огледа у могућности да се целокупни процес развоја и испитивања модела лако и брзо мења, проверава и презентује у било ком тренутку. Могућ је практично неограничен број интервенција које не захтевају враћање на почетак и поновни рад. Овакви модели се могу веома брзо и једноставно електронским путем размењивати или транспортовати.

Применом рачунара веома лако се прелази на презентацију из 3D у 2D и обрнуто.

За формирање свих делова пројектне документације није довољно само познавање рада на рачунару, већ и испуњење других услова које рачунар не може понудити као решење. То су, на пример, избор угла гледања и колорита, врсте осветљења, композиција приказа, изглед пројектне документације и др.

2. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ О МАЛИМ ХИДРОЕЛЕКТРАНАМА - САСТАВНИ ДЕЛОВИ И КАРАКТЕРИСТИКЕ

Мале хидроелектране су постројења у којима се потенцијална енергија воде најпре претвара у кинетичку енергију (у статору турбине), а потом у механичку енергију (у ротору турбине) окретањем вратила турбине па се коначно добија електрична енергија у генератору електричне струје који је механички спрегнут са турбином. Мале хидроелектране су у последњој деценији XX века добиле значај у решавању хидроенергетског потенцијала малих водотокова, посебно у земљама западне Европе које су претежно заокружиле искоришћење хидроенергетског потенцијала већих водотокова.

Мале хидроелектране (слика 1.1) представљају комбинацију предности производње електричне енергије из енергије хидропотенцијала и децентрализоване производње електричне енергије, док истовремено не показују негативне утицаје на околину као велике хидроелектране.

Неке од предности малих хидроелектрана:

- нема великих трошкова дистрибуције електричне енергије,
- нема негативног утицаја на екосистем као код великих хидроелектрана,
- јефтино одржавање

Поред предности, постоје и одређени недостаци који се јављају код хидроелектрана, а највише су изражене код великих хидроелектрана, попут:

- изградња бране може довести до великих катастрофа за цели екосистем низводно од бране, а поред тога спречавају и миграције риба,
- река својим током носи материјал у облику биљног отпада, песка и муља, што с временом доводи до таложења тог материјала у воденом базену испред бране, а последица тога је смањивање дубине воденог базена,
- у подручјима, где је температура виша, приликом труљења, распадања, биљних остатака заробљених под водом, долази до стварања угљен диоксида(CO_2) и метана,
- стварање буке.

Машинска зграда код мале хидроелектране своди се на једну просторију изнад проточног турбинско-генераторског агрегата и управљачког ормана. Ти агрегати су врло погодни код великих хидромелирационих и пловидбених система (хидроелектрана и пловидбених систем на реци Рони у Француској)¹². Прорачун габарита зграде мале хидроелектране ради се на једноставан начин. За познате улазе, пад и инсталирани проток, се из номограма

¹² <http://www.malehidroelektrane.com/9-masine>

типизираних турбина произвођача усваја тип турбине, пречник радног кола, номинални број обртаја и слично. Најпогодније турбине за изградњу малих хидроелектрана су Банкијеве турбине. Цевне турбине покривају падове 1 до 25 метара.¹³

У већини случајева, повољне локације за мале хидроелектране налазе се у горњим деловима водотокова, јер географски гледано водотоци обично у том подручју имају стрмији пад који се постепено смањује како се водоток приближава ушћу. Нарочито су занимљиве локације на самом изворишту водотока, јер често повољне географске карактеристике омогућавају извођење акумулације на самом извору.

Једна од опција развоја енергетике у мањим земљама као што је Србија, јесте коришћење малих хидроелектрана зато што је тако добијена енергија обновљива и еколошки најприхватљивија. Спектар позитивних утицаја изградње малих хидроелектрана је веома широк и огледа се у томе што се њиховим радом не узрокује емисија нечистих материјала у ваздух, спречава се опасност од поплаве, могу се искористити за водоснабдевање, наводњавање и регулацију водотока. Мале хидроелектране се дизајном могу уклопити у пејзаж, не изазивају сеизмичност ни промену климатских карактеристика подручја.

Мала хидроелектрана се не може посматрати као једноставна редукована верзија велике хидроелектране. Специфична опрема која се уграђује у мале хидроелектране, условљава испуњавање фундаменталних техничких правила, уз неопходну примену једноставних техничких решења погона, високу ефикасност, поузданост и могућност одржавања објекта од стране лица за које није неопходно да су техничари или специјалисти за мале хидроелектране.

Планирање пројеката малих хидроелектрана захтева спровођење великог броја техничких, економских и еколошких анализа на различитим степенима обраде у циљу одређивања да ли је нека локација технички искористива, еколошки прихватљива и економски исплатива за реализацију једног таквог пројекта.

Инсталисана снага мале хидроелектране на некој локацији пропорционално зависи од протока и висине пада на тој локацији. Међутим, у тој зависности садржана је и одређена неизвесност, јер износ очекиване производње енергије зависи од количине расположиве воде, односно од промене протока током године.

Исплативост улагања у једну локацију зависи од капацитета електране, односно од снаге и енергије која се очекује од посматраног пројекта, од могућности продаје произведене електричне енергије као и од њене откупне цене. При томе је кључна локација мале хидроелектране са обзиром од удаљености од јавне електроенергетске мреже.

¹³ <http://www.malehidroelektrane.com/9-masine>

Укратко мале хидроелектране састаје се од хидрограђевине (преграда, доводни и одводни канали и други објекти, машинска зграда), водне турбине и генератора електричне енергије. Њена изградња и инсталација је лимитирана пре свега висином пада и количином протичуће воде односно протока. Само разумним усклађивањем оба фактора може се постићи ефикасно коришћење расположиве хидрауличке енергије. Висина пада се не мења много током године, али се зато количина воде тј. проток значајно мења не само током године, већ се и просечни годишњи протоци узајамно разликују. Само статистичка обрада дугог низа година, са свим сушним и кишним периодима, могла би дати тачнији одговор по питању количина воде и расположивог протока. Ту је неопходно ослонити се на сазнања и предлоге хидролога, хидрогеолога и других експерата.

Уважавајући претходно наведено видљиво је да се планирање изградње малих хидроелектрана мора суочити са неким додатним проблемима у односу за изградњу великих хидроелектрана.



Слика 1: Мала хидроелектрана

2.1. Класификација малих хидроелектрана

Мале хидроелектране могу бити¹⁴:

- а) проточне (без постојања акумулације),
- б) са недељном акумулацијом воде (у ову групу спадају мале хидроелектране са великим падом и назначеном снагом већом од 1 MW),
- с) са вишегодишњом акумулацијом воде (ако за горњу границу назначене снаге усвојимо вредност 10 MW, практично нема МХЕ са вишенедељном акумулацијом воде).

¹⁴ http://sh.wikipedia.org/wiki/Male_hidroelektrane

Мале хидроелектране са акумулацијом воде могу бити изграђене са машинском зградом у подножју бране (прибранске МХЕ), или са каналом или цевоводом којим се доводи вода од водозахвата до машинске зграде (деривационе МХЕ), што је случај у нашем пројекту.

Мале хидроелектране са средњим или великим падом обично користе уставе за скретање воде до водозахвата. Од водозахвата до турбине вода се доводи цевоводом или деривацијом под притиском (слика 3).

Основне класификације се врше на основу:

- инсталисане снаге агрегата,
- врсте агрегата у односу на турбине и начин рада,
- броја обртаја,
- начина рада у односу на енергетски систем и
- инсталисаног пада.

На основу инсталисане снаге (слика 2) мале хидроелектране се класификују на:

- пико ХЕ,
- мини ХЕ,
- микро ХЕ и
- мале ХЕ.

МХЕ се даље класификују према:

а) према захвату на:

1. проточне са бочним захватом из главног водотока,
2. са акумулацијом (браном), са дневним, недељним, годишњим или вишегодишњим изравнањем;

б) према регулисаности протока на:

1. МХЕ са протоком који се може подешавати - регулација протока на улазу у турбину (ручна или аутоматска);
2. са сталним протоком.

с) према повезаности са мрежом и начином рада на:

1. изоловане електране (острвски рад);
2. електране везане на мрежу (паралелни рад);
3. електране у којима ради једна, две или више јединица;
4. електране које раде по потреби, у зависности од потрошње.

2.2. Саставни делови система МХЕ

Сви саставни делови мале хидроелектране могу се поделити у три основне групе¹⁵:

- **грађевински делови**, они обухватају: брану, захват, доводни канал (деривацијска или цевоводи под притиском), машинска зграда и одводни канали;
- **хидротехнички делови** који садрже запорнице, решетке, песколове, предтурбинске затвараче, вентиле и излазне делове турбине;
- **електромашинске делове**: турбина, мултипликатор, генератор, трансформатор, регулациони делови, заштитни делови са спојем на електроенергетски систем.

На сликама 3 и 4 приказани су микро хидро системи за мали и велики пад, одакле се могу видети сви елементи који улазе у састав система МХЕ.

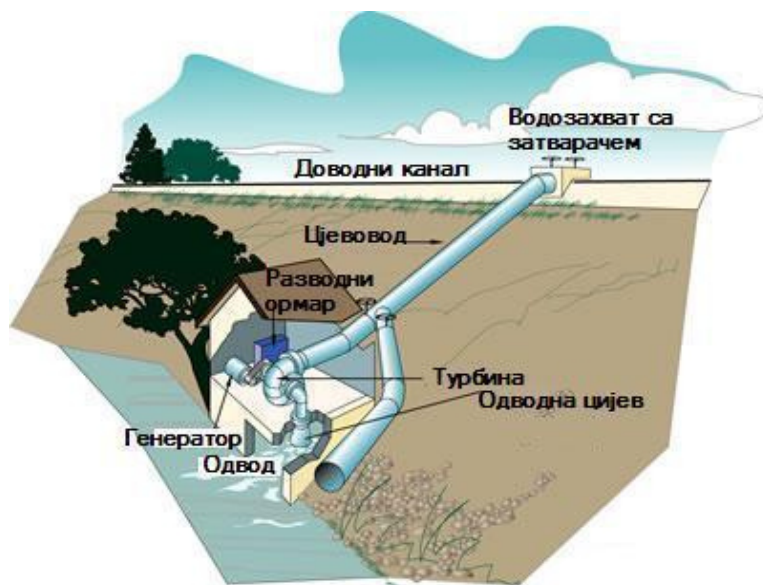
На сликама су дате илустрације проточних малих хидроелектрана које користе проток расположив у датом времену, пошто нема акумулације, самим тим произведена снага се мења са променом протока. Ако вредност протока опадне испод минималног нивоа који је потребан за рад производња електричне енергије се прекида.



Слика 2. Шема МХЕ за велики пад¹⁶

¹⁵ Милослав Михајловић, Мале Хидроелектране, Београд 1995.год

¹⁶<http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/35/mhe%20-%202010.pdf>



Слика 3. Шема МХЕ за мали пад¹⁷

На слици 4. приказана је једна од могућих изведби деривацијског цевовода, као једног од основних и функционално неизоставних грађевинских делова МХЕ.



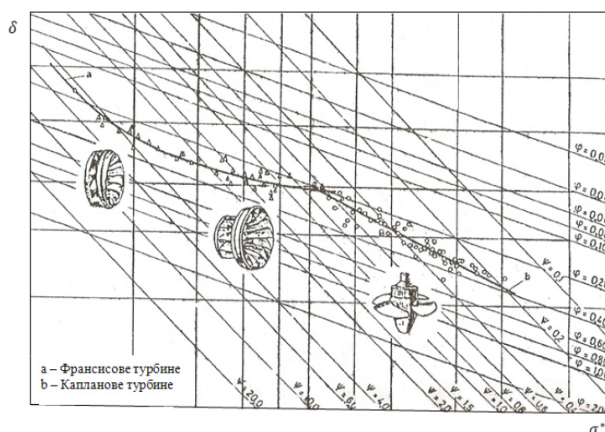
Слика 4. Цевовод¹⁸

¹⁷ <https://www.google.rs/search?q=vodozahvat+turbine&safe>

¹⁸ <https://www.google.rs/search?q=cevovod+turbine&safe=off&espv>

2.3. Акцијске турбине типови и избор

Један од најважнијих делова сваке МХЕ је турбина. Избор турбине, која одговара паду и протоку који се може обезбедити, је изузетно битна ставка при пројектовању.



Слика 5. Препоруке за избор турбина¹⁹

На слици 5 приказан је график који показује различите типове турбина за различите протоке и падове. Са графика се види да области примене појединих типова турбина нису строго разграничене, већ се преклапају. При избору типа турбине за неку хидроелектрану спроводи се детаљна техно-економска анализа уз уважавање специфичности конкретног водотока.

Избор најбоље турбине за сваки појединачни хидросистем зависи од карактеристика, као што су пад и проток који су на располагању. Избор, такође, зависи и од жељене брзине обртања генератора или других уређаја који улазе у састав система.

Временске прилике играју изузетно значајну улогу приликом избора турбине. За сваку турбину задаје се карактеристика снага-брзина и карактеристика степен корисног дејства-брзина. Тежи се изналажењу најефикасније турбине - посебно у погледу пада, брзине и протока.

Турбине се могу грубо поделити на оне са великим, малим и средњим падом, као што је приказано у табели 1. Турбине се, такође, деле и на основу принципа на коме раде, и могу бити акцијске и реакцијске.

¹⁹ <http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/35/mhe%20-%202010.pdf>

Тип турбине	Велики пад	Средњи пад	Мали пад
Акцијске	- Пелтонова - Турго - Вишемлазна Пелтонова	- Банки - Турго - Вишемлазна Пелтонова	Банки турбина са попречним током (crossflow)
Реакцијске		Френсисова	Капланова

Табела 1. Подела турбина према паду

Акцијске су најчешће коришћене турбине у МХЕ²⁰. Генерално, користе се на местима са малим протоцима и релативно великим падовима. Радна кола акцијских турбина (слика 8) раде у ваздуху, а покрећу их једна или више млазница са водом која остаје у атмосферском притиску пре и после контакта са лопатицама. У овим турбинама млазница/е проводи/е воду мање брзине у веома брз/е млаз/еве. Кућиште акцијске турбине је првенствено за контролу распрскавања воде, јер је његова унутрашњост на атмосферском притиску. Акцијске турбине су обично јефтиније од реакцијских турбина, јер код њих није потребно специјално кућиште под притиском, нити брижљиво пројектован размак (засори).

2.4. Кавитација

У хидрауличним турбомашинама, у току рада, може на одговарајућим локацијама да притисак у радној течности опадне испод оног који одговара њеној тачки кључања на тој температури, услед чега ће се на том месту појавити парна фаза (локално кључање). Створени мехурићи парне фазе путују низводно са течном фазом и доспевају у зоне већег притиска, услед чега долази до нагле кондензације парне фазе и ишчезавања мехурића. Ова појава, да се на константној температури радне течности због снижавања и пораста притиска у њој појављују и нестају парни мехурићи, назива се кавитацијом.

Кавитација се нарочито запажа на местима где се нагло мења правац струјница и брзина течности - на пропелерима (слика 7), у центрифугалним пумпама, воденим турбинама итд. Појава још није довољно истражена, али један од узрока су велике брзине на неким местима које доводе до врло ниског притиска у течности (у складу са Бернулијевом једначином). Ако је овај (статички) притисак нижи од напона паре течности, долази до кључања. Настали мехурови паре помешани са флуидом брзо улећу у подручје вишег притиска где се нагло кондензују. Настале капи течности великом брзином ударају у површину.

²⁰http://old.mf.edu.mk/system/files/HEC_D-Gerov%20final.pdf



Слика 6. Кавитација на пропелеру

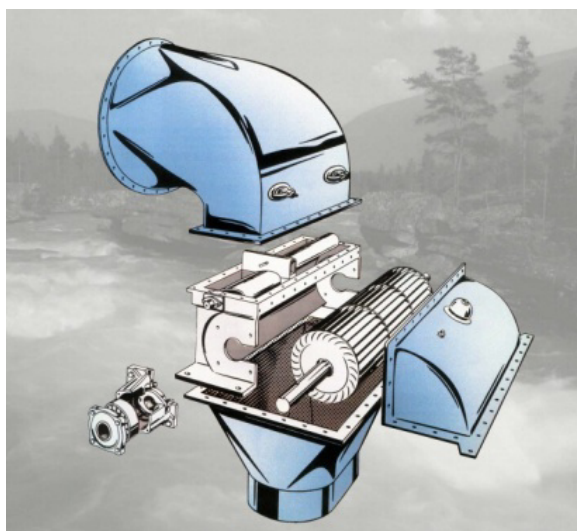
Појава се опажа по вибрацијама и звуку - лупању. На местима где се јавља кавитација локални притисци могу бити и до 200 бара²¹, услед чега и долази до механичког разарања материјала (стварање јамица и хабање уопште). Такође се смањује и користан ефект турбине, јер се део енергије губи у виду топлоте кључања.

Кавитација настаје када се прекорачи критична брзина која зависи од укупног притиска и својстава течности (густине и напона паре). Услови за достизање ове брзине се спречавају конструкционим путем.

²¹<http://www.dodaj.rs/f/Y/XJ/3YNlzkKo/uvod-i-fizicka-svojstva-.pdf>

3. БАНКИ ТУРБИНЕ

Банки–Мичел–Осбергове, (crossflow) турбине са попречним током (слика 8) користе се за падове у опсегу од (5 –200)m и протоке од $20 \frac{l}{s}$ до $10 \frac{m^3}{s}$. Степен искоришћења им је знатно нижи у поређењу са осталим типовима турбина, јер је губитак пада у њима веома висок и јефтиније су. При коришћењу у МХЕ веће снаге поузданост им је слаба, због високих механичких напрезања. За веће снаге се користе само у случајевима ограничених инвестиционих фондова, на пример при електрификацији руралних подручја.



Слика 7. Банки-Мичел-Осбергова турбина (са тропроточним радним колом)

За градњу МХЕ малих инсталисаних снага изузетно су повољне Банки турбине (слика 8) јер имају низ других погодности као што су: поузданост у раду, раде са добрим степеном искоришћења у широком дијапазону протока, отпорне су на појаву кавитације, а њихова једноставна конструкција омогућава да се она лако елиминише, отпорне су на појаву хидрауличног удара при наглом отварању предтурбинског затварача, једноставне су конструкције и лако их је израдити у свакој мало боље опремљеној радионици, јединична цена њихове израде је врло ниска у односу на друге турбине, малих су димензија и веома су лаке за монтажу и демонтажу, дозвољена варијација протока је велика и износи $Q_{max} = 5Q_{min}$. Троуглови брзина и конструктивне карактеристике Банки турбине су детаљно представљени и презентовани у наредном поглављу у делу у ком је извршено њено димензионисање.

За разлику од других водних турбина, које имају аксијални или радијални проток воде, код банки турбина млаз воде пада попречно и пролази кроз лопатице турбине.

Слично као код воденичког кола, вода пада на крај радног кола или ротора. Будући да млаз воде пролази два пута кроз лопатице турбине, то је повољно за искоришћење.

Када вода напушта радно коло Банкијеве турбине, она помаже прању ротора од нечистоћа и мањих крхотина.

Основна карактеристика ове турбине је да користи широки правоугаони водени млаз воде који путује кроз радно коло преко сваке оштрице лопатице два пута (по једном у сваком правцу). Млаз протиче прво од периферије ка центру, а онда након преласка у отворен центар простора радног кола, изнутра ка споља.

Банкијеве турбине се често конструишу с два радна кола на истом вратилу у истој турбини (са двоточним раним колима) која су различитог капацитета. Ротори су истог пречника, али различитих дужина лопатица, тако да примају различити проток воде. Тај однос протока је обично 1:2.²² Конструкција за довод воде има могућност да се мења довод воде за 33 %, 66 % и 100 % снаге турбине, а то зависи од расположивог протока воде. Највећа предност ових турбина је једноставна конструкција и мањи трошкови уградње.

²² <ftp://is.fin.kg.ac.rs/Arhiva/radovi/4958.pdf>

4.ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТУРБИНСКОГ ПОСТРОЈЕЊА

У оквиру овог поглавља биће описана методологија пројектовања турбинских постројења, дат приказ функционалне шеме и структурне елементе система за регулисање броја обртаја Банки турбина.

При пројектовању једног турбинског постројења треба сагледати све главне карактеристике истог, па на основу захтева правити план и пројекат читаве хидроелектране.

Основне карактеристике једног турбо постројења дефинисане су следећим показатељима:

- **инсталисана снага** је аритметичка сума укупних снага генератора;
- **инсталисани проток Q_i** , максимални протицај који постројење може да користи у нормалном погону, имајући у виду пропусну способност турбина и читаве доводне и одводне деривације (тенденција повећања оптималне инсталисаности иницира потребу предвиђања фазног грађења са постепеним повећањем инсталисаности; инсталисаност сваког турбинског постројења разматра се оптимизацијом свих меродавних фактора);
- **фактор снаге** је однос којим се дефинише улога постројења у генерисању активне и реактивне енергије;
- **максимална снага** турбинског постројења је највећа снага коју то постројење може да постигне у најповољнијим условима (разликује се максимална бруто - на прикључцима генератора, и максимална нето снага, на прагу електране);
- **распожива снага** је највећа снага коју постројење може да развије у неком конкретном временском пресеку, полазећи од реалног стања погонске спремности (ремонт, дефекти итд.) и стања дотока и акумулације;
- **гарантована снага** турбинског постројења је снага коју постројење увек може да произведе, са обезбеђеношћу око 90 - 95% (код проточних хидроелектрана зависи од протока у периодима малих вода, док код акумулационих хидроелектрана зависи од пада и протока који могу да се реализују при најнижим радним котама у акумулацији);
- **максимални и минимални бруто пад** су екстремни падови при којима постројење може да ради (средњи пад се најчешће дефинише трајањем 50% на линији трајања бруто пада);
- **могућа средња годишња производња** је аритметичка средина могућих годишњих производњи турбинског постројења под претпоставком да нема ограничења могућности пласмана енергије;

- **реализована производња** је производња која је обично нешто нижа од могуће, због ограничења у пласману енергије. као и због губитака услед испада погона и појединих делова хидроелектране (за планирање рада електроенергетског система сачињавају се анализе вероватноће могуће производње);
- **могућа производња варијабилне и константне енергије** показује могућност постројења да енергију акумулише и пласира је у вршни део дијаграма дневног оптерећења.

У циљу сагледавања услова под којим је могућа градња хидроелектране, препоручује се примена методолошког приступа, који резултира дефинисањем реално оствареног потенцијала за хидроелектране.

Приступ пројектовању постројења МХЕ састоји се од следећих активности:

- дефинисање потенцијалне локације,
- начелног дефинисања еколошке прихватљивости локације,
- успостављаа мерења на водотоцима,
- спровођења основне анализе исплативости пројеката,
- увршћавања локације просторне планове и водопривредне основе,
- извођења теренских обилазака - пројектовања,
- усвајања просторно - планских ограничења,
- усвајања еколошких ограничења,
- усвајања ограничења заштите културне баштине,
- усвајања ограничења расположивости воде,
- спровођења анализе изводљивости пројекта,
- дефинисања реално остваривог пројекта,
- израде идејног пројекта.

Тек када се сагледају сви ови фактори, онда се може уз мерење и сагледавање других фактора као што су климатски и метеоролошки чиниоци подручја на коме ће се градити хидроелектрана приступити пројектовању турбинског постројења и градњи хидроелектране одређеног типа.

У савременим електроенергетским системима расте потреба за вршном снагом и енергијом, те се тежи да се повећа удео варијабилне енергије, што се постиже регулисањем протока чеоном акумулацијом, елиминисањем погонских ограничења, низводним хидроелектранама са компензационим басенима итд.

Пошто је пројектним задатком који је приложен уз поставку овога завршног рада дата глобална пројектна шема цевовода водопривредног система (слика 9) за који треба пројектовати, изградити и поставити Банки турбину, онда је било неопходно спровести све неопходне прорачуне који као резултат треба да дају:

- криву нето напора турбинског постројења,
- проток, напор и хидрауличку снагу турбине при максималном степену корисности,
- габарите виталних делова Банкијеве турбине,
- криве прорачунских губитака у турбини,
- и остале релевантне податке.

При имплементацији уобичајених прорачуна и литературних смерница²³, а полазећи од задатих вредности приказаних на слици 8, коришћене су при одређивању криве напора препоруке приказане у табели 3.

Сагласно прописаном потупку²⁴ најпре је одређен пречник доводног цевовода:

$$d := 2.69 \left(\frac{n^2 \cdot Q_{opt}^2 \cdot L_u}{H_{geo}} \right)^{0.1875}, \quad d = 0.198,$$

усвајамо: **d = 0,212 m** - пречник цевовода;

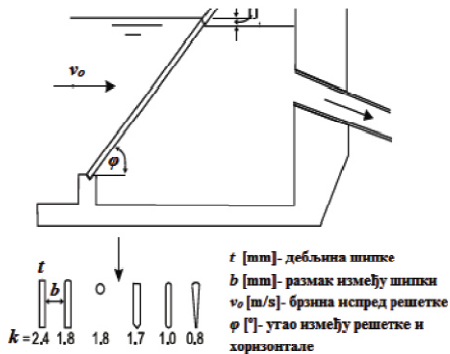
а затим и његова дужина:

$$L_u := 182.61 \frac{\sqrt[3]{(d_u + 0.0147)^4 - d_u^4}}{P_c} = 182.618,$$

и усвојени размак између подупирача цевовода : L=1,83 m.

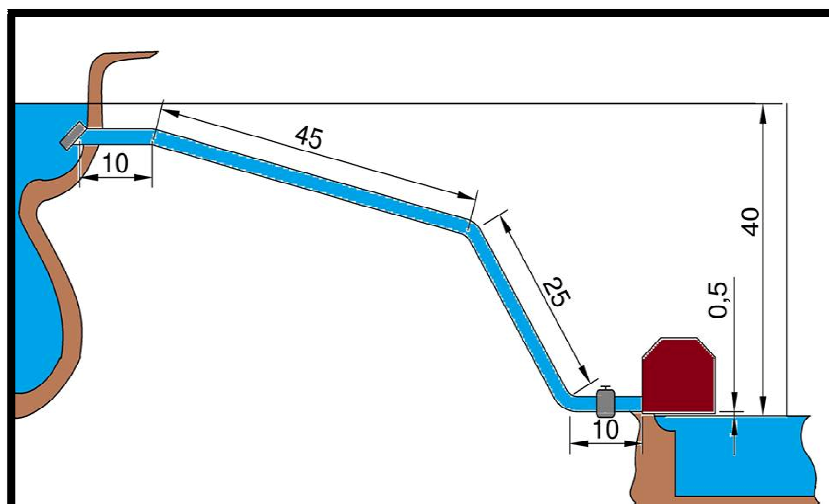
²³ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац. 1997.г.

²⁴ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац. 1997.г.

Ознака	вредност	j- мере	опис
$Q_{\max}$	70	[l/s]	Проток за који је потребно димензионисати цевовод.
H	40	[m]	Висинска разлика водозахвата и доње воде.
L_1	10	[m]	Дужине деоница притисног цевовода за довод воде од водозахвата до турбинског постројења.
L_2	45		
L_3	25		
L_4	10		
t	0,015	[m]	
b	0,09		
φ	45°	[°]	
A_R	2,5	[m ²]	
K_1	0,7	[-]	
ξ_{k1}	0,09	[-]	Коефицијенти локалних губитака у коленима.
ξ_{k2}	0,08		
ξ_{k3}	0,06		
ξ_v	0,2	[-]	Коефицијент локалних губитака у предтурбинском затварачу.

Табела 2. Полазне величине и параметри

Једноставним дељењем укупне дужине цевовода од 90 m са рачунски добијеним растојањем између подупирача од 1,83 m, утврђујемо потребан број подупирача за наш цевовод од укупно 50 комада.

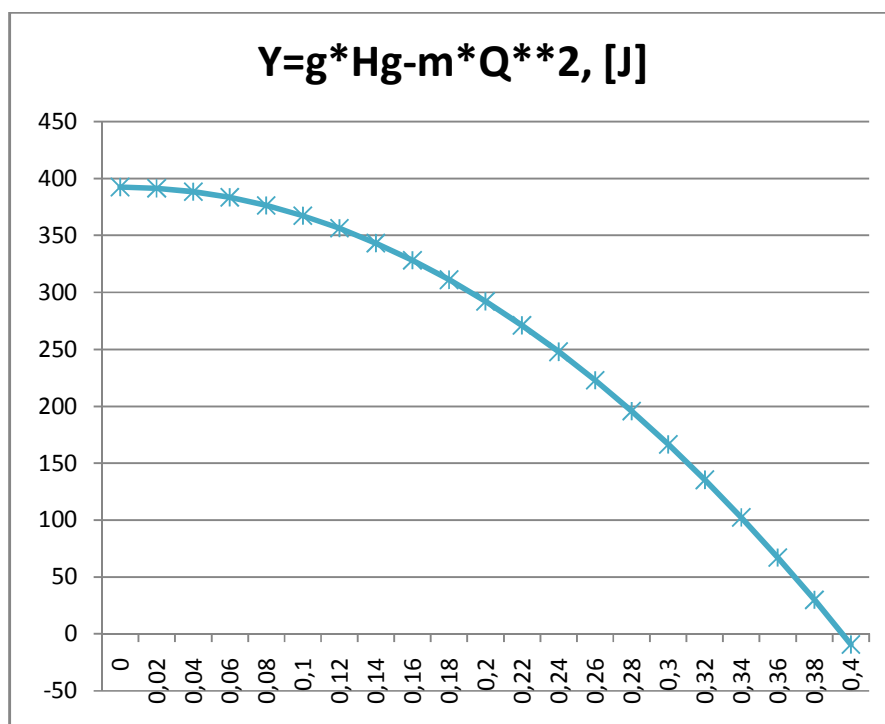


Слика 8. Шематски приказ цевовода и постројења

Р. бр.	Деоница	Димензије цеви/колена	Ком.	Произвиђач
1.	L1	цев ϕ 225/6000	1	Пештан
2.	L1	цев ϕ 225/4000	1	Пештан
3.	L1	колено ϕ 225/45°	1	Пештан
4.	L2	цев ϕ 225/6000	7	Пештан
5.	L2	цев ϕ 225/3000	1	Пештан
6.	L2	колено ϕ 225/45°	1	Пештан
7.	L3	цев ϕ 225/6000	4	Пештан
8.	L3	цев ϕ 225/1000	1	Пештан
9.	L3	колено ϕ 225/45°	1	Пештан
10.	L4	цев ϕ 225/6000	1	Пештан
11.	L4	цев ϕ 225/4000	1	Пештан
12.	L4	Запорни вентил DN 250	1	МИП Ћуприја
13.	све	Подупирач цевовода	50	Амига Краљево

Табела 3. Структура цевовода по деоницама

Сагласно улазним и рачунски добијеним величинама дефинисана је крива цевовода тј. графички је приказана и интерпретирана зависност нето напора турбинског постројења $Y(Q)$ од промене протока Q (слика 9-а).



Слика 9-а. Карактеристика нето напора турбинског постројења

Напомињемо да крива нето напора турбине има следећи облик:

$$Y(Q) := g \cdot H_{\text{geo}} - m \cdot Q^2$$

при чему, на основу пројектних параметара доводног цевовода, њен коефицијент m има вредност:

$$m := \left(\xi_{k1} + \xi_{k2} + \xi_{k3} + \xi_v + \xi_R + \lambda \cdot \frac{L_u}{d_u} \right) \cdot \frac{8}{d_u^4 \cdot \pi^2} = 2.511 \times 10^3$$

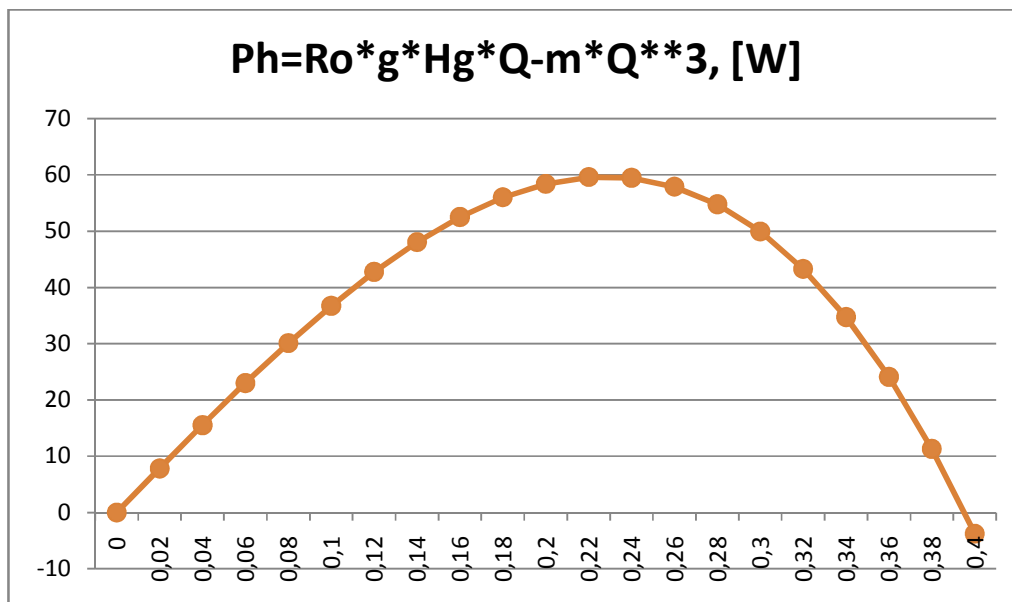
Треба истаћи да коефицијент отпора цевовода m садржи све релевантне и значајне локалне и успутне губитке на које радни флуид наилази на свом путу од водозахвата до турбине.

4.1 Одређивање оптималних хидрауличних параметара постројења

Одређивање оптималних параметара за које треба изабрати малу турбину у датом систему описана је у наредном тексту.

Најпре се одреди зависност хидрауличне снаге турбине од протока на изабраној локацији приказана (слика 69-б):

$$P = Q \cdot \rho \cdot Y = Q \cdot \rho \cdot (g \cdot H_g - m \cdot Q^2) = \rho \cdot g \cdot H_g \cdot Q - \rho \cdot m \cdot Q^3$$



Слика 9-6. Карактеристика хидрауличне снаге турбинског постројења

Затим се одреди проток кроз турбину при коме ће она остваривати максималну хидрауличку снагу:

$$\frac{dP}{dQ} = \frac{d}{d}(\rho \cdot g \cdot H_g \cdot Q - \rho \cdot m \cdot Q^3) = 0$$

$$\rho \cdot g \cdot H_g - \rho \cdot 3 \cdot m \cdot Q^2 = 0$$

$$Q_{p_{\max}} = \sqrt[2]{\frac{g \cdot H_g}{3 \cdot m}} = 0,228 \text{ , m}^3/\text{s}$$

Максимална хидраулична снага која би у овом систему могла да стоји на располагање турбини износи:

$$P_{\max} = Q_{p_{\max}} \cdot \rho \cdot (g \cdot H_g - m \cdot Q_{p_{\max}}^2) = 294,60 \text{ W.}$$

При избору оптималних енергетских параметара на основу којих ће се изабрати турбина за ову малу хидроелектрану, мора се водити рачуна о томе да турбина у току свога рада мора имати неопходну резерву снаге за регулацију рада, тј., за одржавање задатог броја обртаја радног кола и генератора електричне струје. Због тога се уобичајено узима да радни проток мора бити око:

$$Q_{opt} = 0,95 \cdot Q_{p_{\max}} = 0,95 \cdot 0,228 = 0,217 \frac{\text{m}^3}{\text{s}},$$

а оптимална хидрауличка снага са којим ће радити турбина постављена на датој локацији треба да износи:

$$P_{opt} = \rho \cdot Q_{opt} \cdot Y_{\dot{V}_{opt}} = \rho \cdot (Y_{br} - m \cdot Q_{opt}^2) \cdot \dot{V}_{opt} = 1000 \cdot (9,81 \cdot 20 - 6,2 \cdot 3,04^2) \cdot 3,04 = 59,703 \text{ W},$$

тј.:

$$P_{opt} = 59,70342 \text{ W.}$$

Снага турбине на вратилу износиће:

$$P_T = \eta_T \cdot P_{opt} = 0,89 \cdot P_{opt} = 53,13605 \text{ W}$$

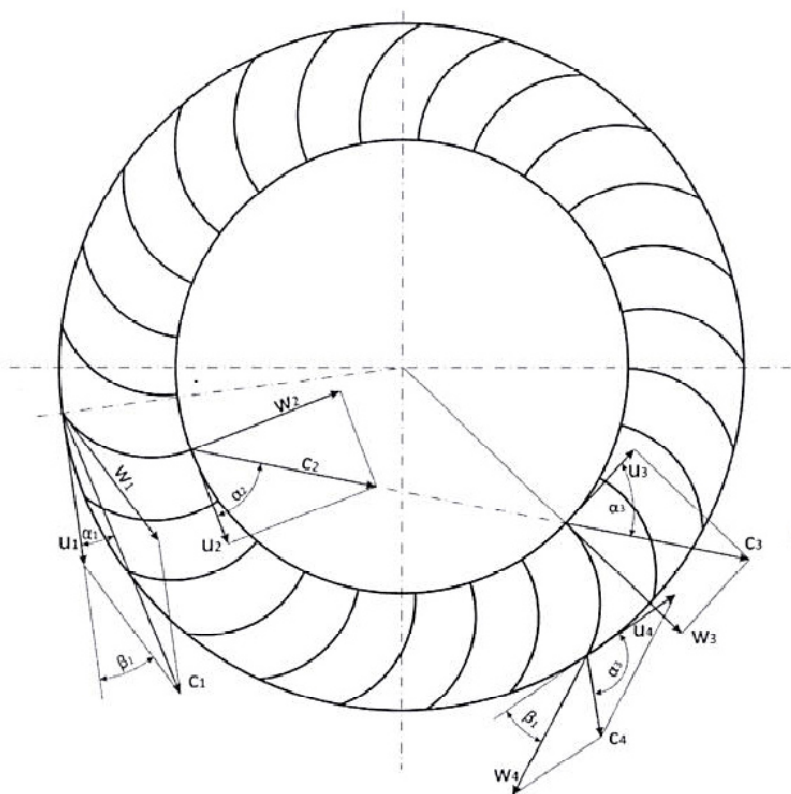
и на основу ње и усвојеног броја обртаја изабраће се одговарајућа турбина.

Избор најбољег типа турбине и генератора првенствено зависи од карактеристика локације за коју се пројектује мала хидроелектрана. При томе морамо узети у обзир расположив пад и количину воде која нам протекне што зависи од саме локације мале хидроелектране, а да одредимо потребну снагу на улазу у турбину и генератор.

При пројектовању мале хидроелектране посебна пажња се обраћа анализи да ли ће се турбина радити са стабилним протоцима.

4.2 Одређивање оптималних параметара турбине

Руководећи се измереним полазним величинама, условима и ограничењима (табела 2.), најпре су сагласно троугловима брзина (слика 11), одређене – димензионисане кинематске величине и одговарајући пречници радног кола Банкијеве турбине.



Слика 10. Троуглови брзина у радном колу Банкијеве турбине

Основни геометријски и кинематски параметри радног кола Банкијеве турбине израчунати су сагласно прописаној методологији²⁵, и износе:

$$n_{rk} := 513.25 \frac{\left(\frac{Y_{max}}{g}\right)^{0.745}}{\sqrt{P}}, \quad n_{rk} = 516.356 \text{ o/min} - \text{број обртаја радног кола}$$

²⁵ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

$$c_1(Q) := \frac{1.343 + 1.372}{2} \cdot \sqrt{Y(Q)}, \quad c_{1.\max} = 26.304 \text{ m/s} - \text{апсолутна брзина млаза на улазу у радно коло}$$

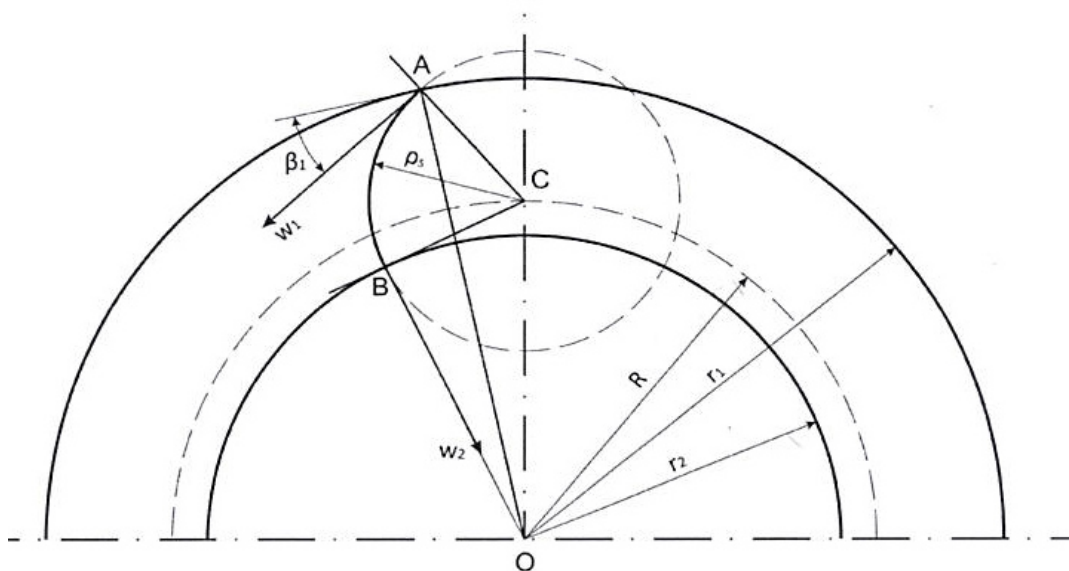
$$u_{1.\max} := \frac{1}{2} \cdot c_{1.\max} \cos(\alpha_1), \quad u_{1.\max} = 12.643 \text{ m/s} - \text{преносна брзина на уласку у радно коло}$$

$$w_{1.\max} := \frac{u_{1.\max}}{\cos(\beta_1)}, \quad w_{1.\max} = 14.574 \text{ m/s} - \text{релативна брзина на уласку у радно коло}$$

$$\omega_{\max} := \frac{u_{1.\max}}{r_1}, \quad \omega_{\max} = 168.569 \text{ 1/s} - \text{угаона брзина радног кола}$$

$$D_1 := \frac{u_{1.\max}^{60}}{\pi \cdot n_{rk2}}, \quad D_1 = 0.15 \text{ m}, \quad D_2 := D_1 \cdot \sqrt{\sin(\beta_1)}, \quad D_2 = 0.106 \text{ m} - \text{одговарајући пречници радног кола}$$

У процесу пројектовања, потом се приступа профилисању лопатица. Наиме, код Банки турбине лопатице се конструишу једним кружним луком (слика 12) при чему средиште предметног кружног лука лежи у пресеку двеју правих од којих прва пролази кроз улазну тачку А, нормално на правац релативне брзине w_1 , док друга пролази кроз тачку В на излазу нормално на правац излазне брзине w_2 , што значи да тангира круг полупречника r_2 .



Слика 11. Профилисање лопатица

Геометријске величине приказане на слици 12, које се користе за цртање лопатица могу се израчунати на следећи начин²⁶:

$$\rho_s := \frac{r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot \cos(\beta_1)}, \quad \rho_s = 0.022 \text{ m} - \text{полупречник лопатице}$$

$$R_{\text{ww}} := \sqrt{r_2^2 + \rho_s^2}, \quad R = 0.057 \text{ m} - \text{полупречник замишљеног круга на коме лежи центар лук лопатице}$$

$$l_{\text{ww}} := \frac{2 \cdot \rho_s \cdot \gamma \cdot \pi}{360 \text{deg}}, \quad l = 0.027 \text{ m} - \text{развијена дужина лопатице}$$

а дебљина млаза и тангенцијално растојање између лопатица имају следеће вредности:

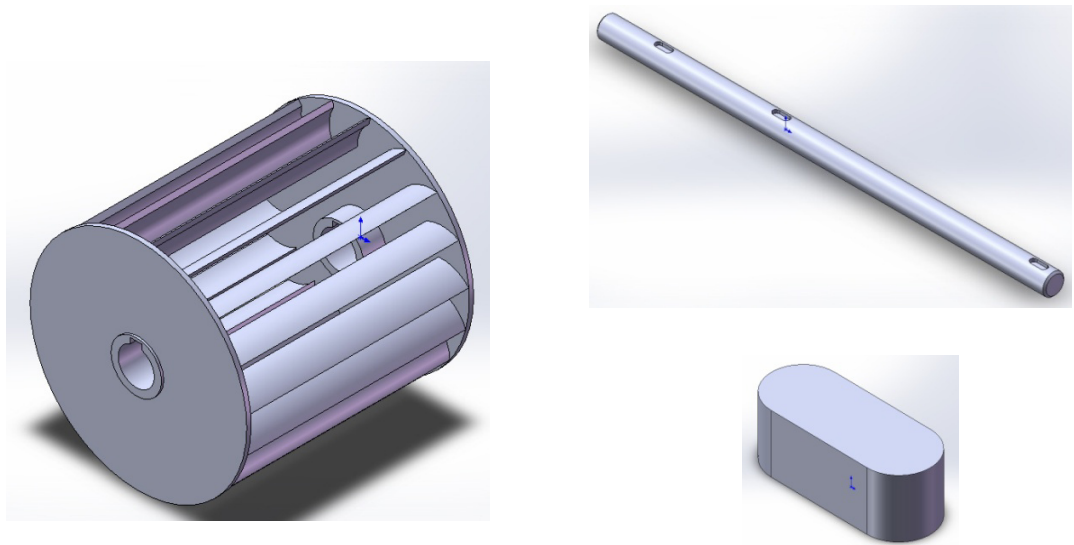
$$t_e := 0.087 D_1, \quad t_e = 0.013 \text{ m}, \quad t_{bs} := \frac{t_e}{\sin(\beta_1)}, \quad t_{bs} = 0.026 \text{ m}$$

$$z := \frac{\pi \cdot D_1}{t_b}, \quad z = 18 - \text{број лопатица радног кола}$$

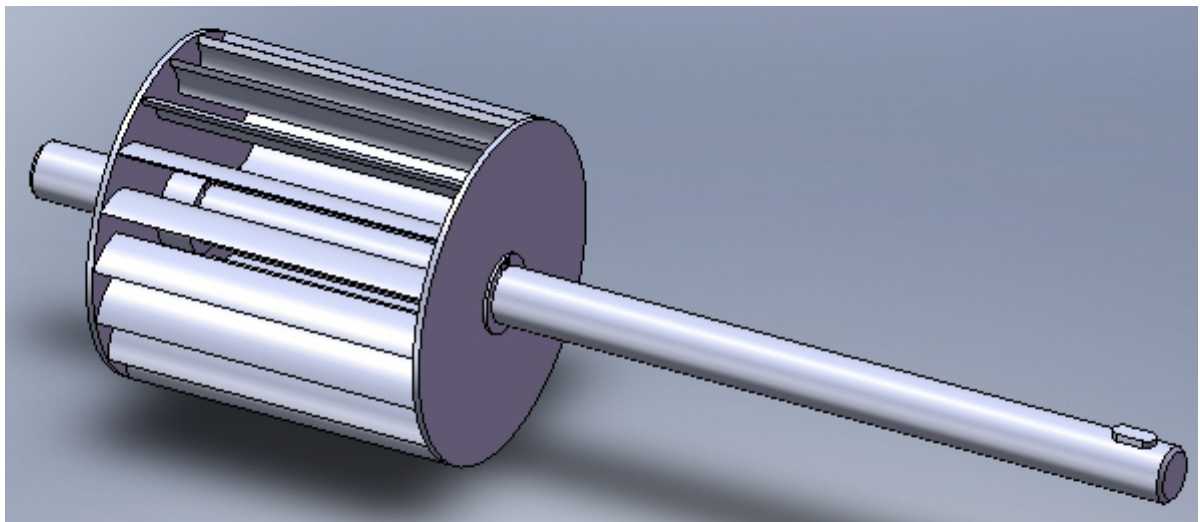
4.3 Израда електронског 3Д модела Банкијеве турбине

У складу са прорачуном добијеним димензијама и препорукама извршено је моделирање радног кола (слика 12), а потом и избор и моделирање обртног вратила са одговарајућим клиновима, чијом монтажом је добијен склоп радног кола (слика 13)

²⁶ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.



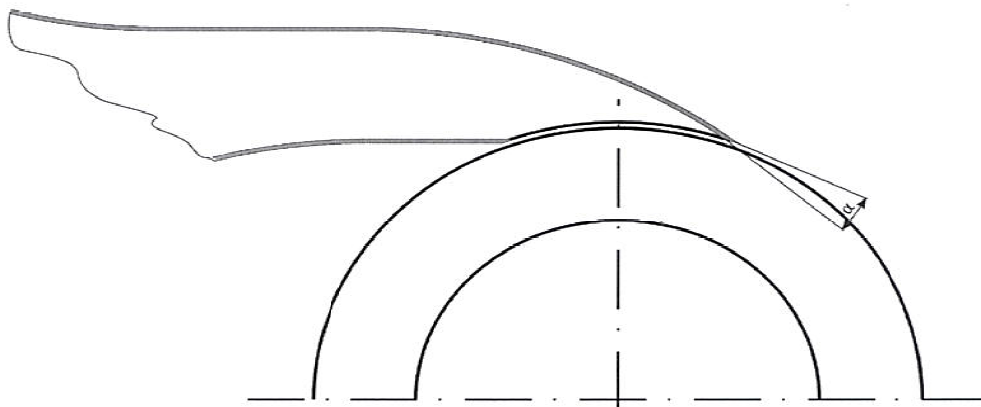
Слика 12. Модел радног кола, обртног вратила и клина



Слика 13. Модел склопа радног кола

У даљем поступку извршено је димензионисање и профилисање млазнице слика 14 са препорученом вредношћу угла млазнице α од $16^{\circ 27}$:

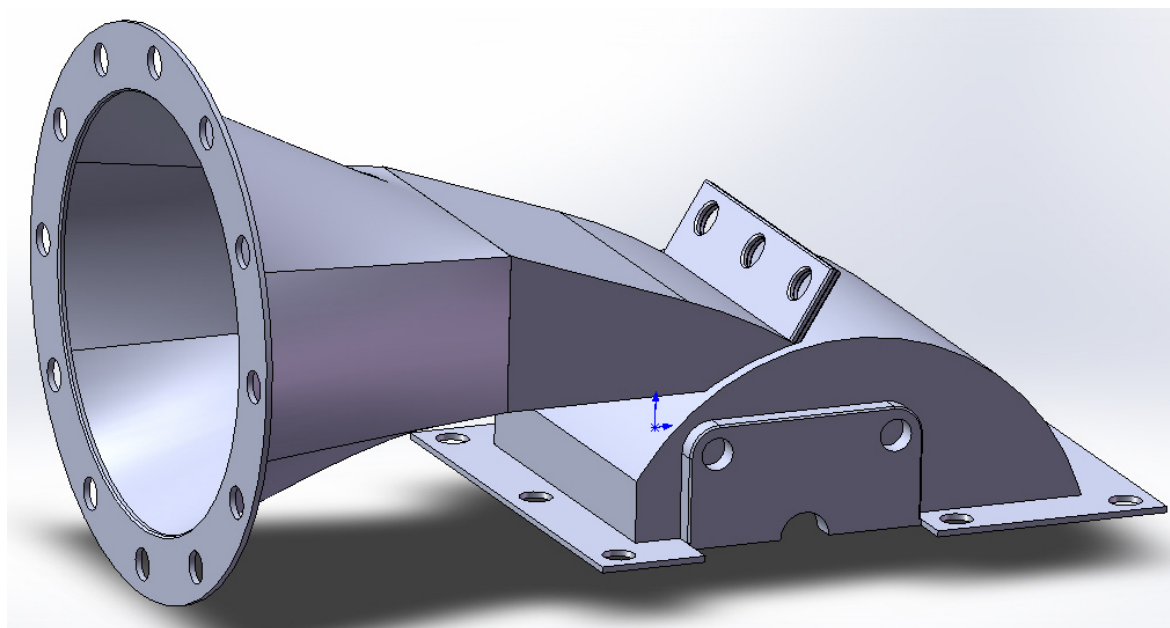
²⁷ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

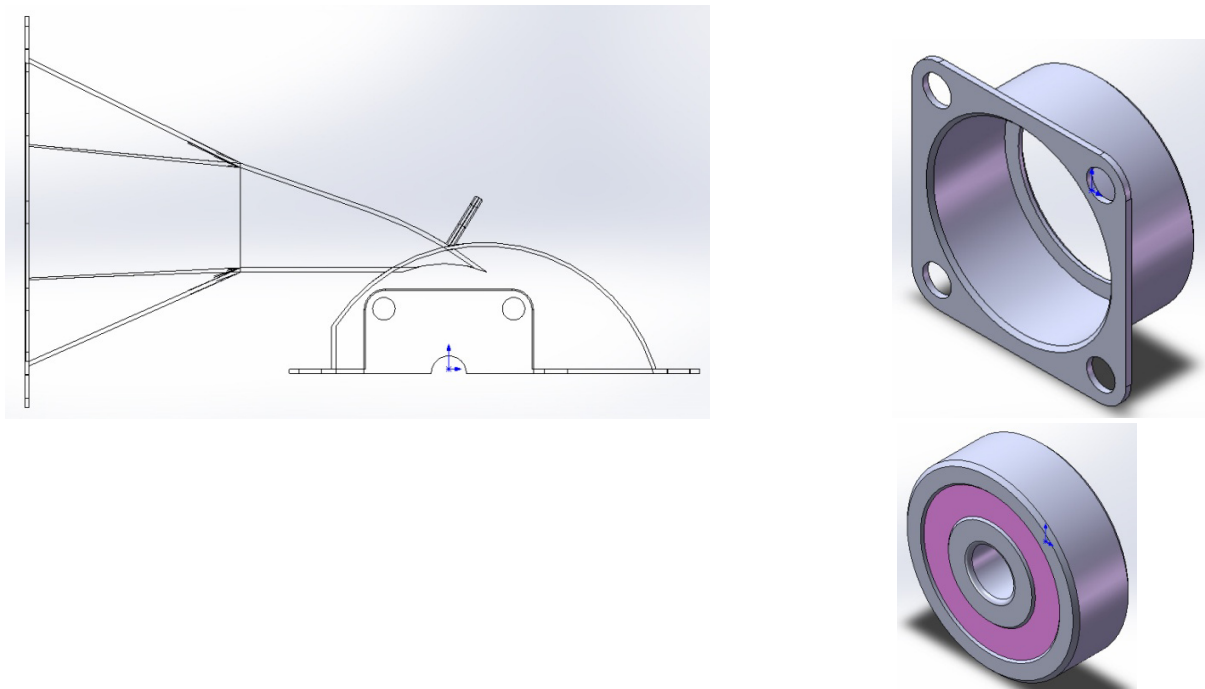


Слика 14. Млазница

$$B := 2.51 \cdot \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\sqrt{Y_{\max}}}}, \quad B = 0.151 \text{ m} - \text{ширина млазнице}$$

$$S_0 := \frac{Q_{\max}}{c_{l.\max} B}, \quad S_0 = 0.018 \text{ m}$$

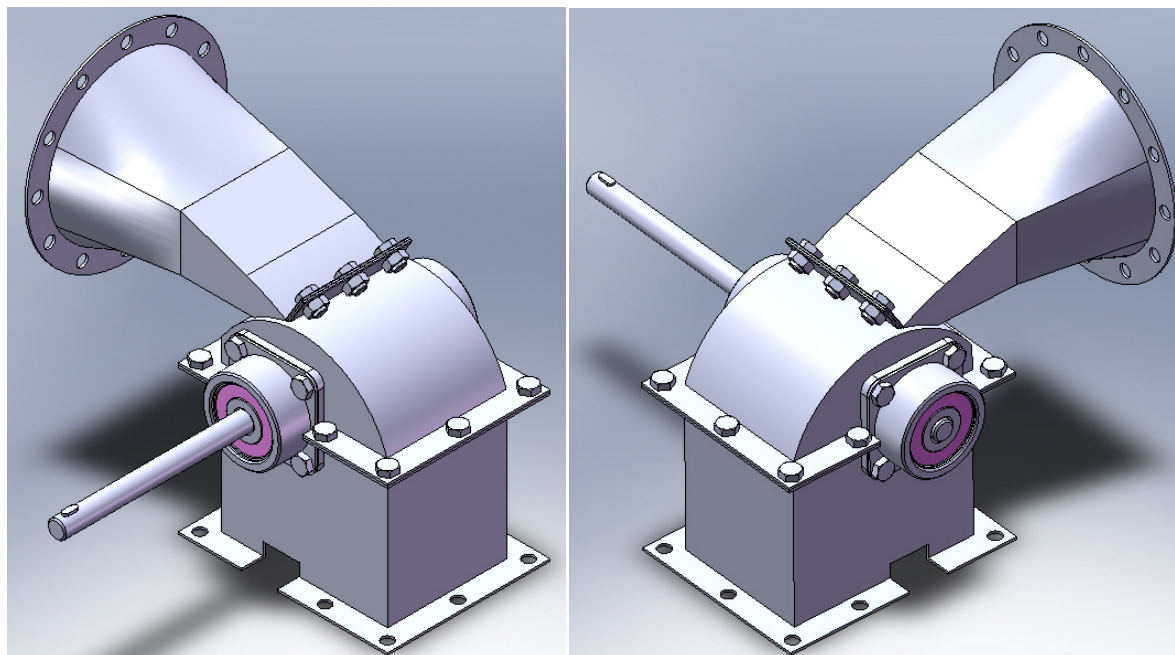




Слика 15. Горњи поклопац кућишта са млазницом, кућиштем за лежај и изабраним лежајем

У складу са извршеним димензионисањем виталних делова Банки турбине, моделирани су горњи део кућишта који је раздвојивом везом (вијци – навртке - заптивачи) ради евентуалне лакше и независне демонтаже спојен са млазницом (слика 15). Такође, извршено је и моделирање кућишта за лежај, као и избор адекватног компатибилног радијалног лежаја са одговарајућим заптивкама и металним дистанцером (прстеном).

Монтажом склопа радног кола најпре са горњим поклопцем кућишта, потом са заптивкама, лежајевима, дистанцерима – прстеновима између њих, кућиштима за лежајеве и, на послетку, са доњим делом кућишта конципирана је и у потпуности измоделирана Банка турбина према потребама и условима (слика 16). Склопни технички цртеж турбине са свим потребним димензијама и пресецима, као и технички цртежи радног кола и обртног вратила биће дати и презентовани на крају овог рада.



Слика 16. Модел Банки турбине

С обзиром да је претходним прорачуном дефинисан нето напор турбине Y , узимајући у обзир све значајне успутне и локалне губитке у њему и извршено димензионисање турбине, могуће је даљим прорачуном доћи до одговарајућих рачунских карактеристика турбине. У првом реду то су: хидраулични губици, волуметријски губици, губици услед трења диска и механички губици. Поступак прорачуна²⁸ приказан је у наредном тексту.

Хидрауличка снага на улазу у турбину при максималном степену корисности турбине износи:

$$P_{Hopt} = \rho \cdot Q_{opt} \cdot Y_{opt} = 59,703 \text{ W}$$

Хидраулички губици услед трења у радном колу износе²⁹:

$$\Delta Y_{Hkt.max} := \lambda_r \cdot \frac{L_k}{4 \cdot R_h} \cdot \frac{W_{sr}^2}{2}, \quad \Delta Y_{Hkt.max} = 7.051 \text{ J/kg} - \text{хид. губици услед трења у радном колу}$$

²⁸ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

²⁹ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

Хидраулички губици који настају услед удара млаза радног флуида о лопатице радног кола се рачунају према следећем обрасцу³⁰:

У обрасцу није ω , већ w

$$\Delta Y_{Hku} := \xi \cdot \frac{\Delta w_u^2}{2}$$

Међутим, за потребе овог пројекта усвојено је да ударни губици чине 5% од хидрауличких губитака услед трења у радном колу ΔY_{Hkt} .

$$\Delta Y_{Hku,max} := 0.05 \cdot \Delta Y_{Hkt,max} = 0.353 \text{ J/kg} - \text{ударни хидраулички губици}$$

$$\Delta Y_{H,max} := \Delta Y_{Hk,max} + \Delta Y_{Hu,max} = 7.474 \text{ J/kg} - \text{укупни хидраулички губици}$$

$$P_{\Delta YH,max} := Q_{max} \cdot \rho \cdot \Delta Y_{H,max} = 523.161 \text{ W} - \text{снага која се утроши на покривање хид. губитака}$$

$$P_{kn,max} := P_{H,max} - P_{\Delta YH,max} = 2.574 \times 10^4 \text{ W} - \text{нето снага радног кола}$$

Волуметријски губици за радну тачку у којој турбина ради са максималним степеном корисности рачунају се по следећој процедури:

$$\Delta Y_{i,max} := \frac{P_0}{\rho} - \frac{\omega_{max}^2}{8} \cdot (r_1^2 - r_2^2) = 89.998 \text{ J/kg} - \text{волуметријски губици}$$

$$P_{\Delta m,max} := \Delta m_{max} \cdot Y_{th,max} = 1.24 \times 10^3 \text{ W} - \text{утрошак снаге на покривање волуметриј. губитака}$$

$$Y_{th,max} := \frac{P_{kn,max}}{\rho \cdot Q_{max}} = 367.72 \text{ J/kg} - \text{стварни рад турбине (слика 17)}$$

$$P_{k,max} := P_{kn,max} - P_{\Delta m,max} = 2.45 \times 10^4 \text{ W} - \text{снага радног кола}$$

Губици услед трења диска за радну тачку у којој турбина ради са максималним степеном корисности рачунају се по следећој процедури³¹:

³⁰ Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

³¹ . Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

$P_D := M_D \cdot \omega_{\max} = 33.774 \text{ W}$ – утросак снаге услед трења бочних површина диска о флуид

$P_C := M_C \cdot \omega_{\max}$, $P_C = 0.066 \text{ W}$ - утросак снаге услед трења цилиндричне пов. диска о флуид

$P_{i.\max} := P_{k.\max} - P_R = 2.443 \times 10^4 \text{ W}$ – унутрашња снага радног кола

Механички губици када турбина ради у радној тачки са максималним степеном корисности представљају збир губитака у заптивачима и у лежајевима, који су последица дејства силе трења F_{tr} ³²:

$$P_m = P_{mz} + P_{ml}$$

Међутим, за потребе овог пројекта усвојено је да механички губици износе 3% од улазне хидрауличке снаге P_H , или конкретно:

$$P_{m.\max} := 0.03 \cdot P_{H.\max}, P_{m.\max} = 787.906 \text{ W}$$

Снага турбине и максимални степен корисности турбине када она ради у радној тачки са максималним степеном корисности може се израчунати на следећи начин:

$$P_{\text{rac}.\max} := P_{i.\max} - P_{m.\max} = 2.364 \times 10^4 \text{ W}$$

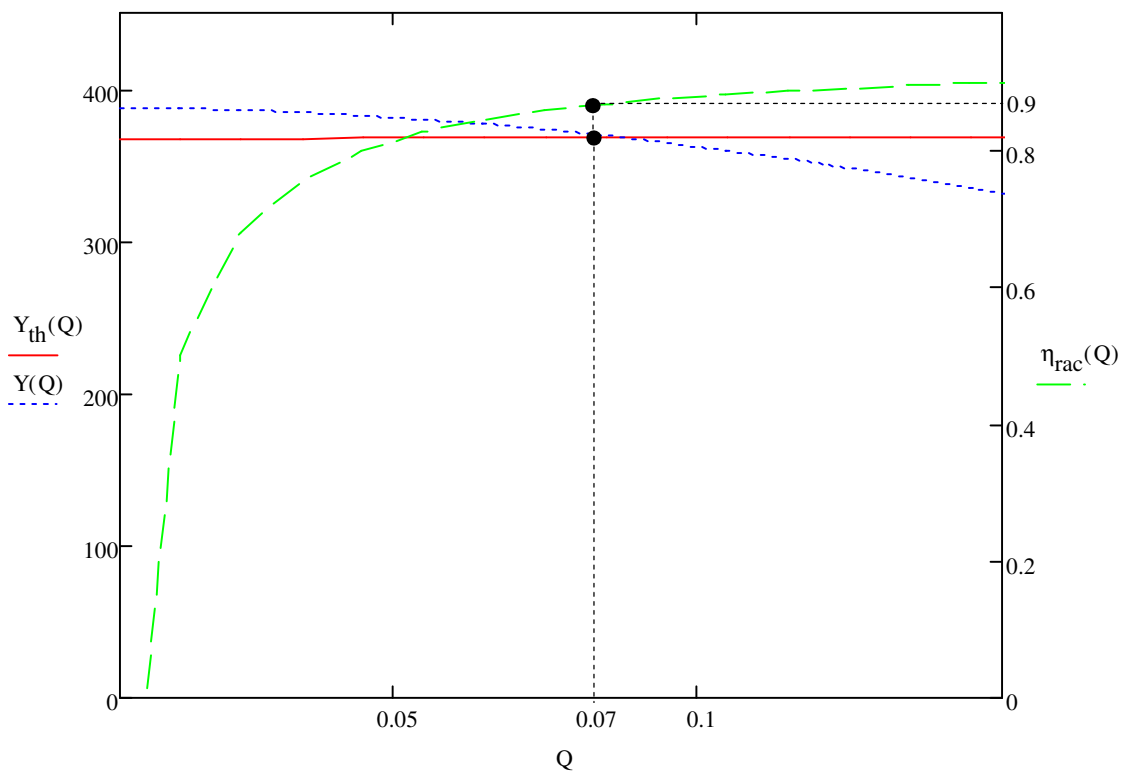
$$\eta_{\text{rac}.\max} := \frac{P_{\text{rac}.\max}}{P_{H.\max}} = 0.9 \text{ - степен корисности турбине (слика 17)}$$

На поменутом графичком приказу (слика 17) јасно су уочљиви токови промене ове три функције, као и њихова међусобна зависност и корелативност са променом протока. У пресеку кривих напора постројења $Y(Q)$ и стварног напора турбине $Y_{th}(Q)$, добијена је **радна тачка турбине**, која се налази управо на вертикали за максимални проток и израчунату вредност степена корисности $\eta(Q)$.

У складу са извршним прорачуном, имајући на уму постојећа стандардна техничка и конструкцијска решења, чији избор је у великој мери зависи и од расположивих материјалних средстава, приступили смо конципирању и моделирању турбинског постројења.

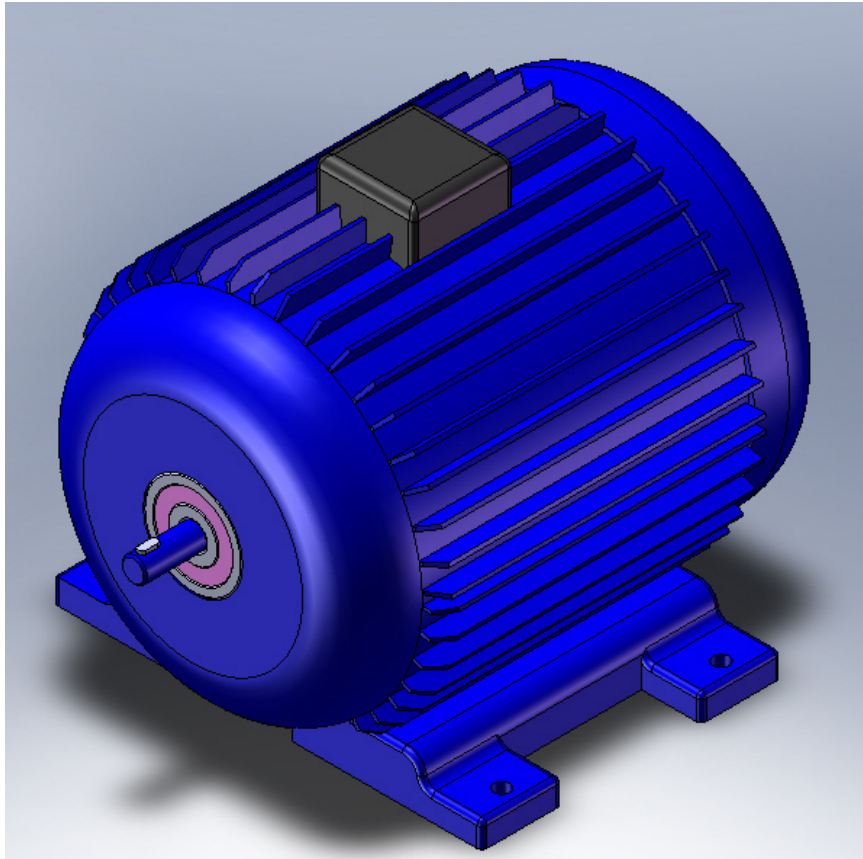
Наиме, настојало се, да се рачунски добијене величине што ефикасније и верније апроксимирају и коригују са постојећим и у датим условима могућим конструкцијским решењима, уважавајући економски аспект целог пројекта, а притом не нарушавајући потребну функционалност и ефикасност.

³² Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац, 1997.г.

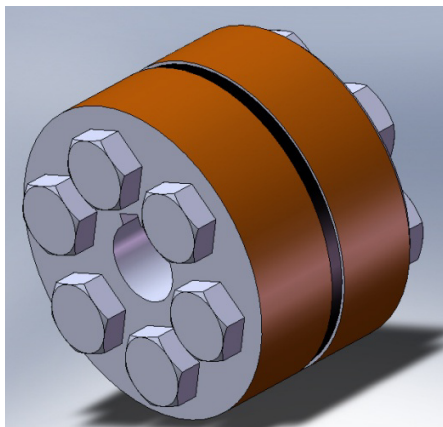


Слика 17. Карактеристике цевовода, турбине и степена корисности

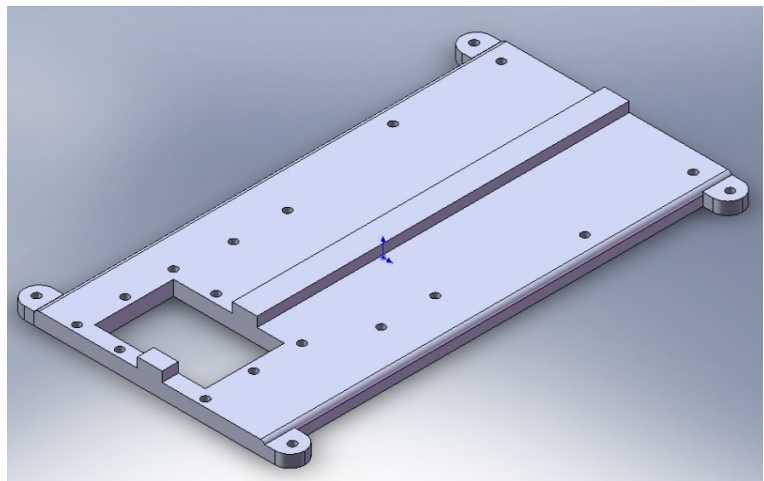
Сходно томе извршили смо димензионисање, избор, моделирање и набавку: електричног генератора (слика 18), адекватне спојнице (слика 19), запорног вентила (слика 22), као и моделирање и израду држача – прихватника обртног вратила (слика 21) и постоља (слика 20).



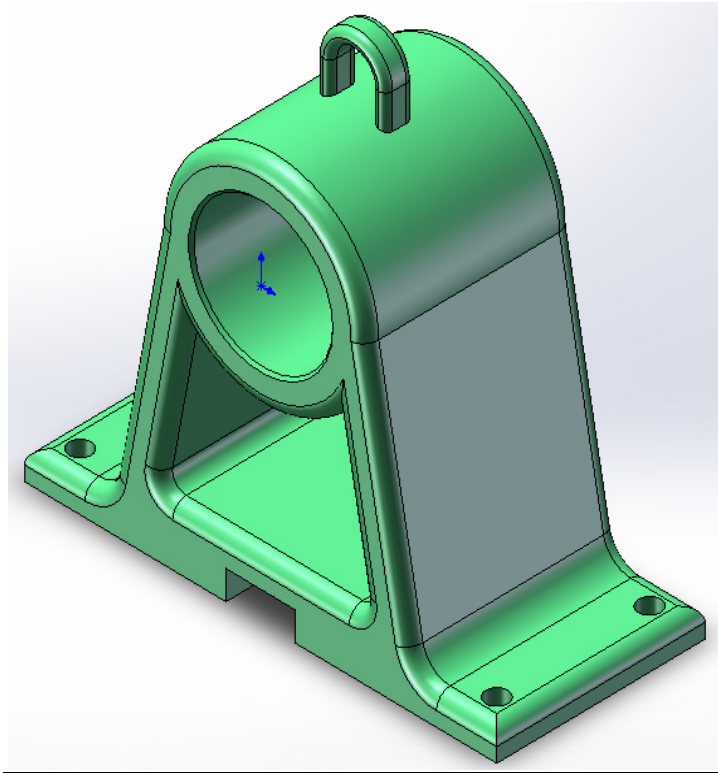
Слика 18. Електрични генератор



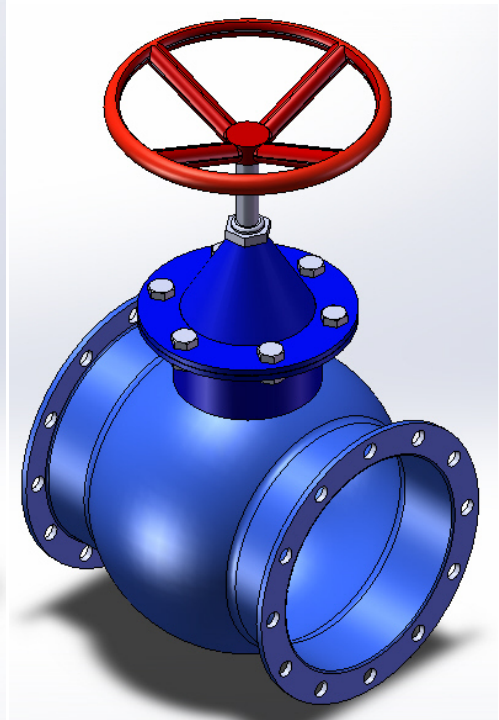
Слика 19. Спојница



Слика 20. Постоље турбинског постројења

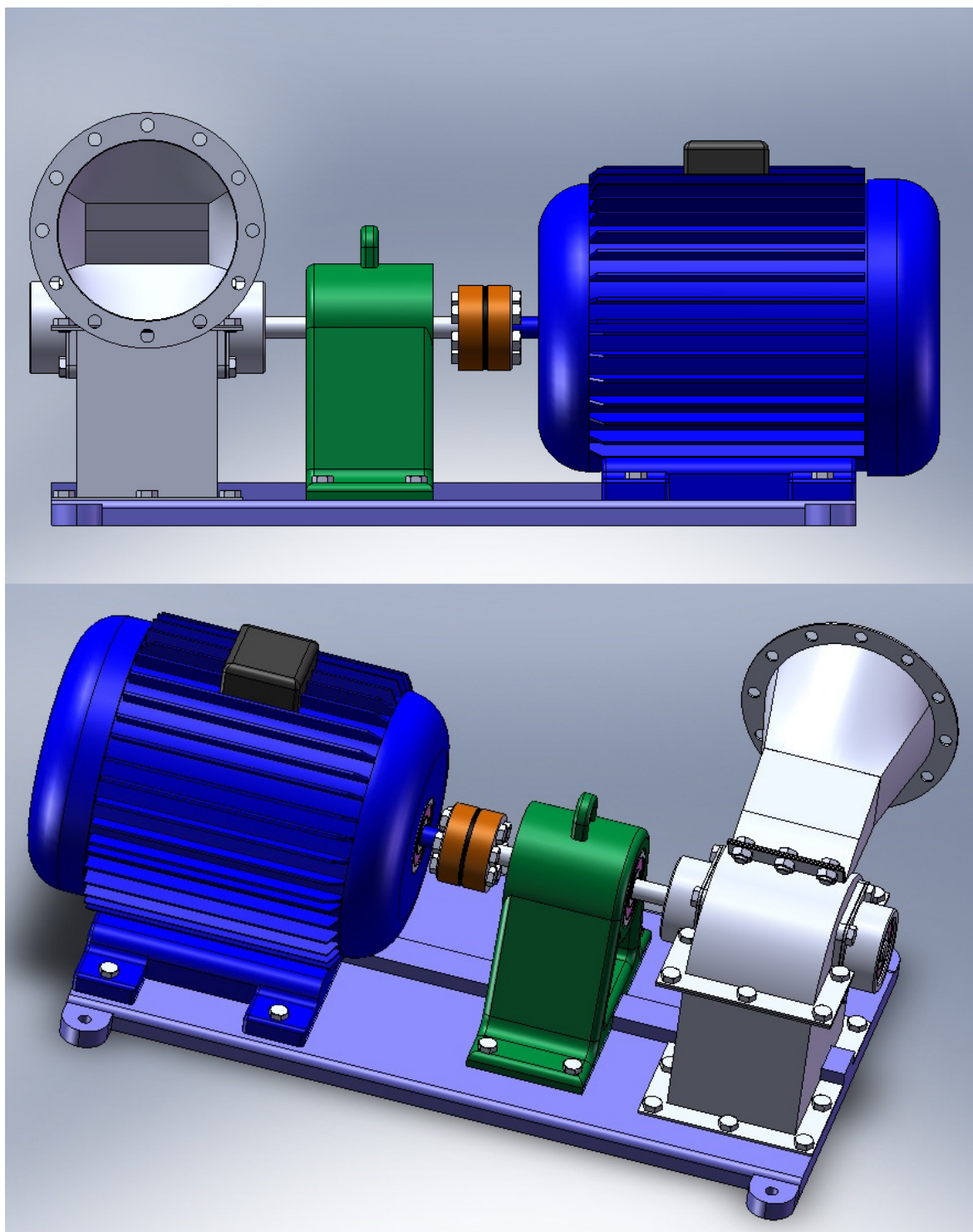


Слика 21. Држач-прихватник обртног вратила



Слика 22. Запорни вентил

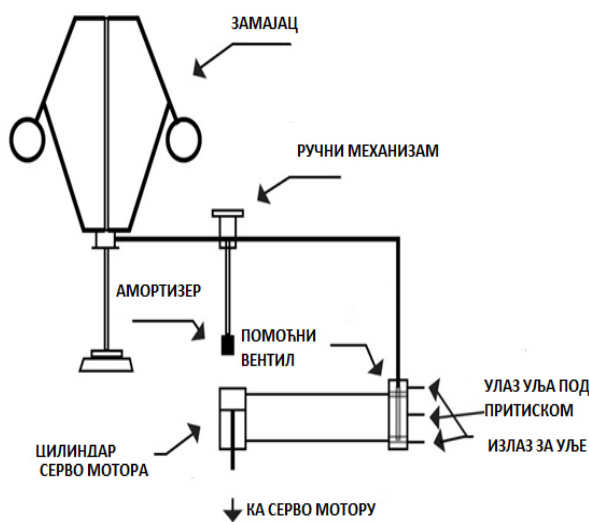
Монтажом предметних и презентованих машинских елемената, подсклопова и склопова са набављеним компонентама добили смо модел турбинског постројења (слика 23)



Слика 23. Турбинско постројење

4.4 Кратак осврт на принципе регулисања броја обртаја Банкијеве турбине

За аутоматску регулацију броја обртаја турбине (протока) због своје поузданости, једноставне конструкције, цене и компатибилности, изабран је механичко-хидраулички механизам са замајцем за регулацију (слика 24), који је управо због поменутих карактеристика нашао примену код немалог броја акцијских турбина.

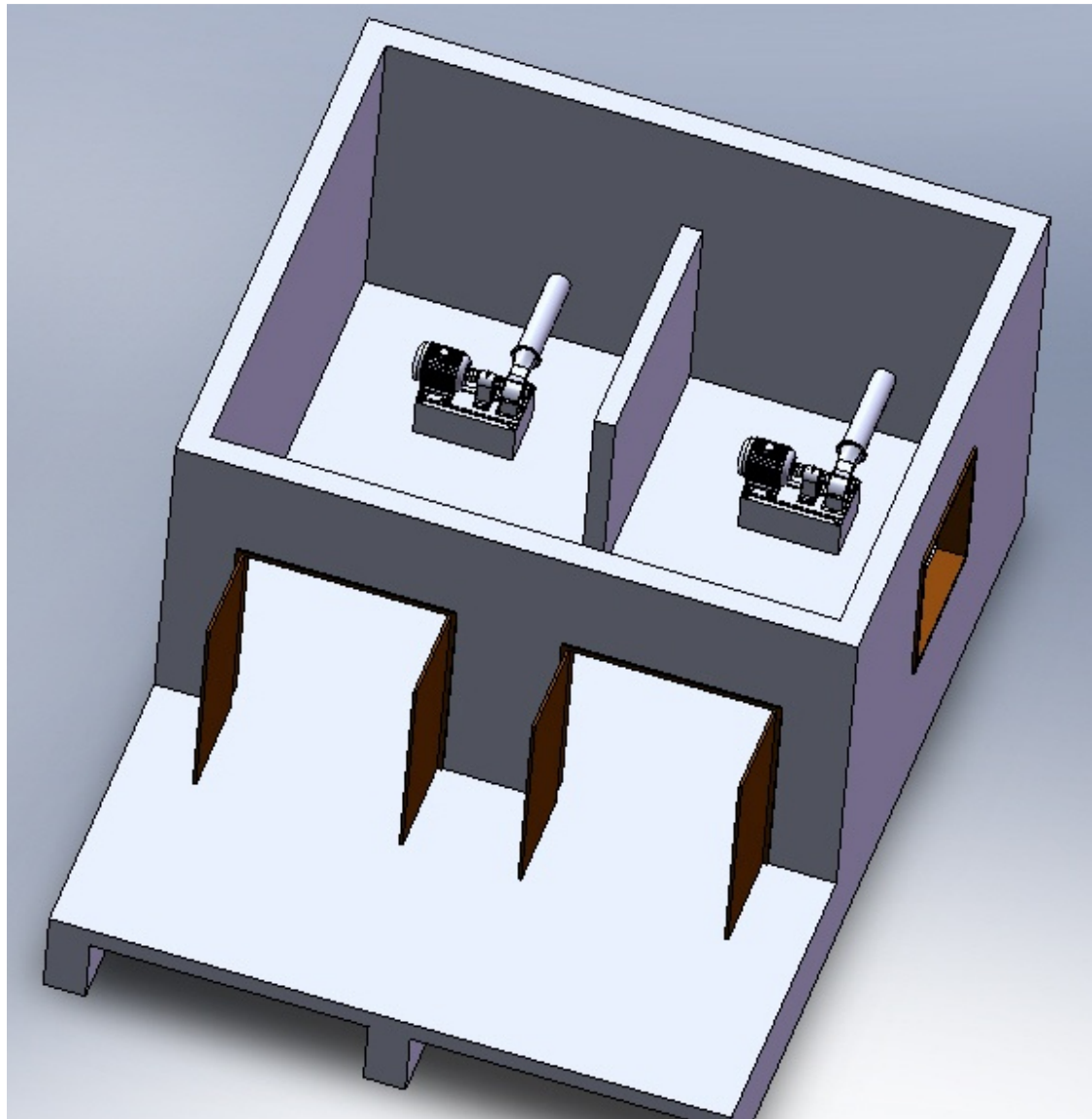


Слика 24. Механичко-хидраулички механизам са замајцем

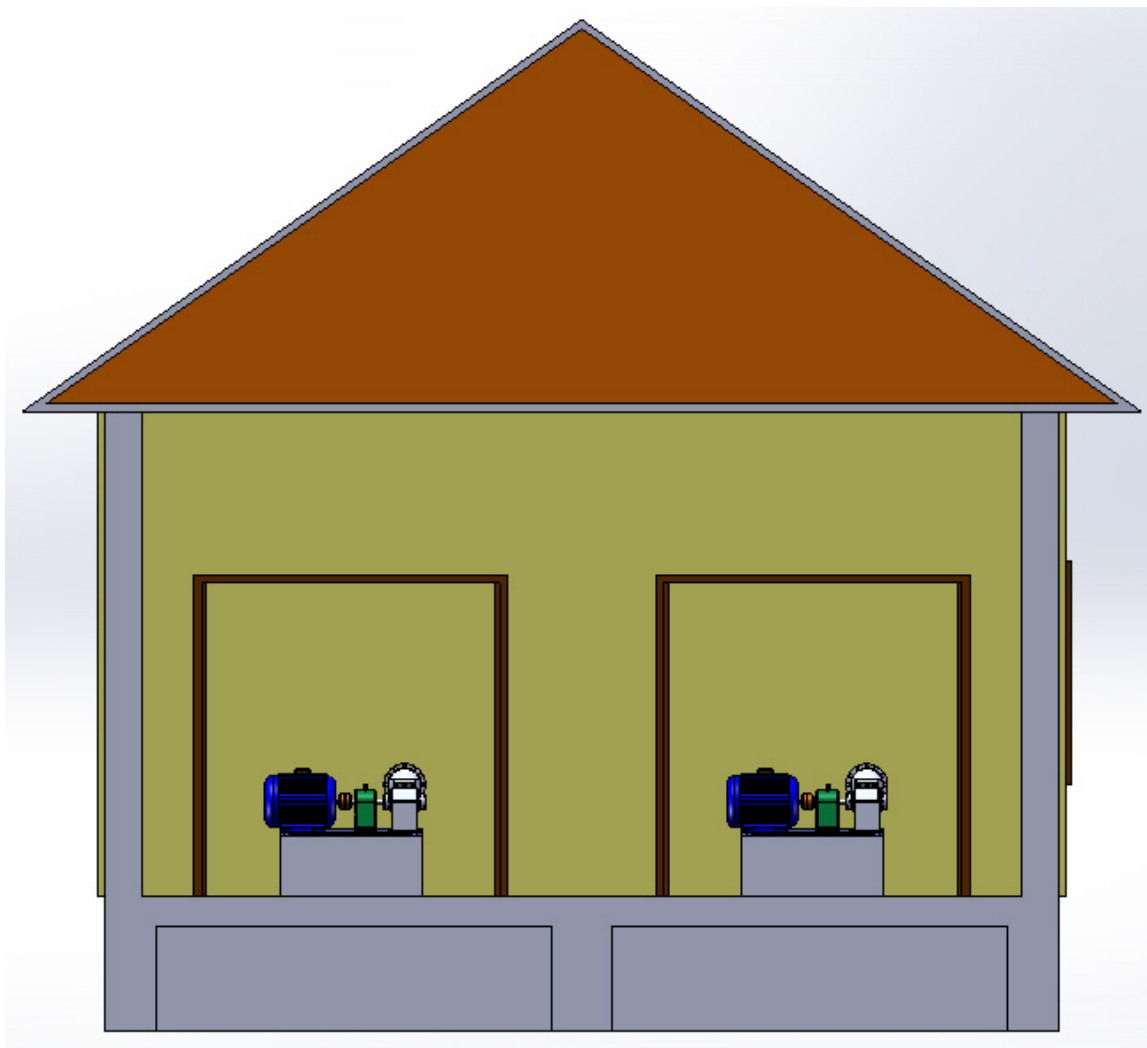
Ови регулатори су лакши и прецизнији од класичних механичких регулатора. Регулатор се везује на главну осовину турбине и ради на принципу замајца. Са променом брзине турбине мења се положај кугли, чиме се утиче на положај вентила постављених на улазу у турбину. Када се турбина преоптерети замајцац успорава, због чега се кугле спуштају ка осовини и подиже се затварач помоћног вентила да би се омогућио улаз у горњу комору серво-мотора. Као што слика 24 илуструје, претходно изазива померање клипа сервомотора великом силом и отвара вентил турбине тако да је допуштен већи проток воде кроз турбину. Већи проток дозвољава турбини да производи захтевану снагу за нове потрошаче. Ручна контрола на регулатору се користи за постављање радне брзине и покретање или искључивање система.

Симултано са моделирањем, изградом и монтажом турбинског постројења, изабрани и ангажовани извођач радова на изградњи грађевинског објекта за стационирање и

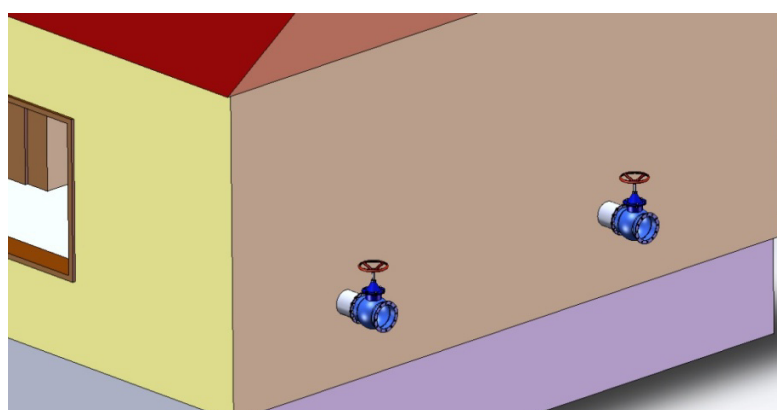
инсталирање турбинског постројења исти изграђује, прибавља припадајуће дозволе за градњу и употребу, те се приступа монтажи, инсталирању, пуштању у рад и експлоатацију мале хидро-електране (слике 25, 26, 27, 28 и 29).



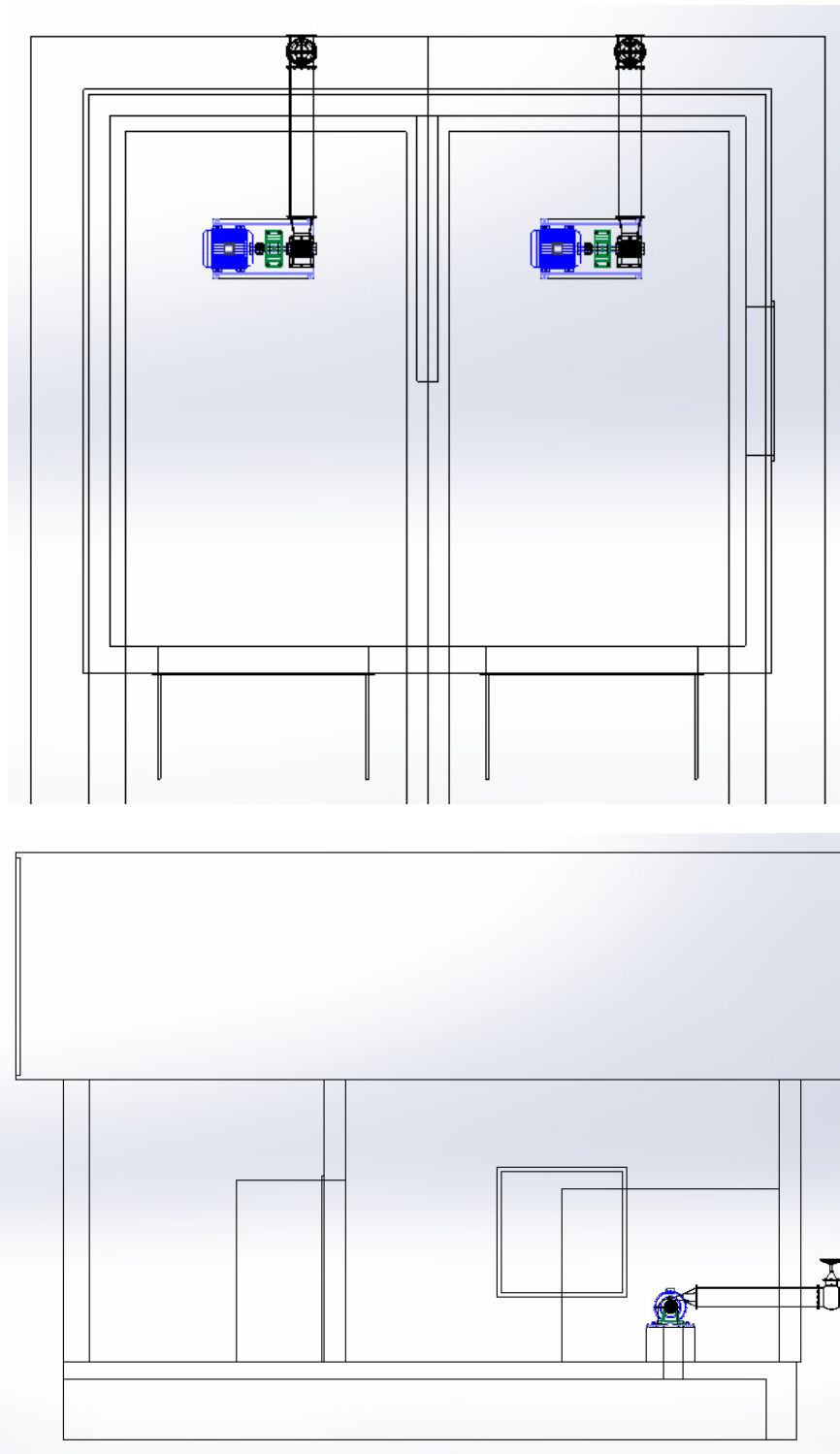
Слика 25. Позиција турбинских постројења у објекту



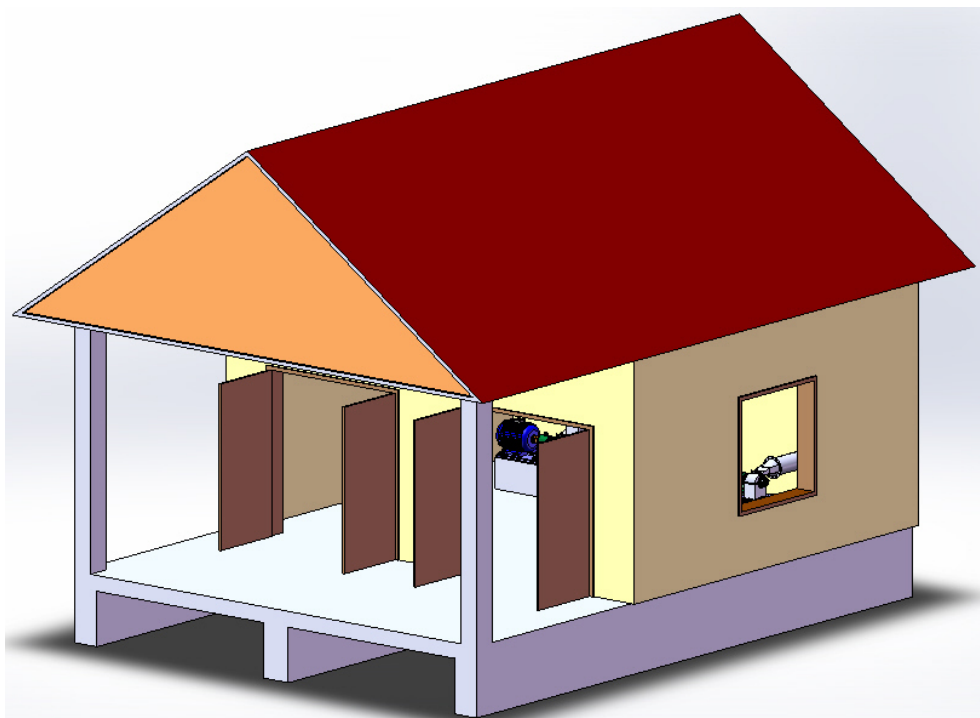
Слика 26. Позиција постројења са фронталне стране објекта



Слика 27. Позиција запорних вентила на задњој страни бјекта



Слика 28. Позиција дела доводног и одводног цевовода и канала у објекту



Слика 29. Објекат спреман за експлоатацију

5. ПРИКАЗ ПОСТУПКА ИЗРАДЕ, МОНТАЖЕ И ОДРЖАВАЊА БАНКИЈЕВЕ ТУРБИНЕ КОЈА ЈЕ РАЗВИЈЕНА У ОКВИРУ ЗАВРШНОГ РАДА

5.1 Кратак приказ изведене конструкције

На основу прорачуна и конструкцијске документације, у овом раду израђен је лабораториски модел Банкијеве турбине. Фотографије склопа, подсклопова и важнијих подструктура налазе се на сликама:



Слика 30. Изведени модел Банки турбине



**Слика 31. Изведени модел радног кола
Банки турбине**



**Слика 32. Изведени модел кућишта
Банки турбине са радним колом**



Слика 33. Изведени модел кућишта Банки турбине - поклопац са млазницом

5.2 Коришћени материјали

У наредној табели 4. приказани су материјали од којих су израђени склопови и подсклопови лабораторијског прототипа Банкијеве турбине.

Р.Б.	Делови склопа	Коришћени материјал	Обрада
1.	Вратило	Челик	Универзални струг
2.	Клин	Челик	Глодалица
3.	Чеони дискови	Лим	Преса са профилисаним алатом
4.	Лопатице	Лим	Преса са профилисаним алатом
5.	Куглични лежајеви (SKF)	Челик	/
6.	Кућишта лежајева	Челик	Универзални струг
7.	Кућиште турбине са млазницом	Лим-Прохрон	Преса са профилисаним алатом

Табела 4. Обрада и материјали коришћени за прототип Банки турбине

5.3 Упутство за пуштање у рад турбине и за одржавање

Након инсталираног комплетног постројења на жељеној позицији, можемо приступити пуштању у рад саме турбине. Отварањем запорног вентила (слика 22.) пропуштамо радни флуид (воду) под притиском из цевовода преко млазнице у радно коло (слика 13.) турбине које се налази у кућишту. На тај начин (с обзиром да је радно коло спрегнуто са вратилом) вршимо претварање хидрауличке енергије воде у механички рад

Одржавање турбине вршимо тако што контролишемо:

- лежајеве,
- радно коло са лопатицама,
- заптивачке елементе и што
- с времена (једном у 15 дана) на време уклањамо наплав са решетке на улазу у доводни цевовод.

Одржавање управљачког ормана МХЕ и електро опреме врши се у складу са препорукама пројектаната, испоручиоца и у складу са позитивним законским прописима који се односе на ту област.

6. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА ПРОЈЕКТА И РЕАЛИЗАЦИЈЕ

Приликом испитивања, планирања, пројектовања и избора са набавком појединих компонената турбинског постројења, као и израде објекта за смештај и експлоатацију турбинског постројења, са инсталацијом припадајуће и пратеће опреме и уређаја, утрошена су следећа материјална средства:

- Ангажовање тешких грађевинских машина на припреми терена и ископу потребних ровова укупно..... 40 h x 100 €/h = **4.000 €**.
- Трошкови израде грађевинског пројекта за адекватан објекат за смештај турбинског постројења, од стране за то овлашћеног пројектанта грађевинске и електро струке.....39 m² x 8 € = **312 €**.
- Израда грађевинског објекта за смештај и експлоатацију турбинског постројења са свим потребним и припадајућим инсталацијама, од стране ангажованог и овлашћеног грађевинског предузећа..... 39 m² x 300 € = **11.700 €**.
- Самостално димензионисање, моделирање и израда целокупне Банки – турбине, изражено кроз утрошен материјал, уграђене машинске делове и остале утрошене ресурсе, скупа са постољем, спојницом и држачем – стабилизатором вратила за два постројења.....2 ком. x 1.125 € = **2.250 €**.
- Димензионисање и набавка одговарајућег електричног генератора са припадајућом примарном опремом.....2 ком. x 550 € = **1.100,00 €**.
- Набавка ситнијег машинског материјала, првенствено: вијака, навртки, чивија, подлошки, подметача, заптивки, осигурача, средстава за подмазивање и др., неопходних за самосталну монтажу прикључивање, инсталирање, као и пуштање у рад и експлоатацију турбинског постројења укупно.....**93 €**.
- Материјални трошкови за набавку и израду димензионисаног цевовода за покретање и снабдевање турбинског постројења, дати су у табели 4., према деоницама и врсти цеви:

Р. бр.	Деоница	Димензије цев/колена	Цена (€)	Ком.	Свега (€)	Укупно по деоници	Произвиђач
1.	L1	цев ϕ 225/6000	75	1	75	138	Пештан
2.	L1	цев ϕ 225/4000	50	1	50		Пештан
3.	L1	колено ϕ 225/45°	13	1	13		Пештан
4.	L2	цев ϕ 225/6000	75	7	525	580	Пештан
5.	L2	цев ϕ 225/3000	42	1	42		Пештан
6.	L2	колено ϕ 225/45°	13	1	13		Пештан
7.	L3	цев ϕ 225/6000	75	4	300	327	Пештан
8.	L3	цев ϕ 225/1000	14	1	14		Пештан
9.	L3	колено ϕ 225/45°	13	1	13		Пештан
10.	L4	цев ϕ 225/6000	75	1	75	945	Пештан
11.	L4	цев ϕ 225/4000	50	1	50		Пештан
12.	L4	Запорни вентил DN 250	820	1	820		МИП Ћуприја
13.	све	Подупирач цевовода	5	50	250	250	Амига Краљев0
Укупно за деонице L1, L2, L3 и L4						2.240 €	

Табела 5. Цена цевовода према деоницама и компонентама

У близини објекта и постројења постоји могућност прикључења на електричну мрежу потребне снаге и капацитета, тако да додатна улагање у израду посебног електро – енергетског дистрибутивног система за транспорт и продају електричне енергије **нису потребна.**

Укупни материјакни трошкови за наведене ставке: 21.695 €

Уредбом Владе Републике Србије о мерама подстицаја за повлашћене произвођаче електричне енергије, која се примењује од 1. јануара 2014. године, утврђене су подстицајне цене, које су дате у следећој табели 5.:

Редни број	Врста електране повлашћеног произвођача	Инсталисана снага R (MW)	Подстицајна откупна цена (с€/kWh)
1.1		do 0,2	12,40
1.2		0,2 - 0,5	13,727-6,633* P
1.3		0,5 - 1	10,41
1.4		1 - 10	10,747-0,337* P
1.5		10 - 30	7,38
1.6	На постојећој инфраструктури	do 30	5,9

Табела 6. Подстицајне цене ел. енергије за повлашћене произвођаче из обновљивих извора енергије

- Сходно Уредби Владе РС и инсталисаној снази наше хидро-електране загарантована откупна цена је.....12,40 с€/kWh = **0,124 €/kWh**
- Трошкови ангажовања 3 запослена на непрекидном двадесетчетворочасовном дежурству на месечном нивоу износе.....3 x 350€ = **1.050 €/mesec**
- Исти трошкови по часу износе.....(1.050 €/mesec : 30) : 24 = **1,46 €/h**
- Једночасовни приход од производње електричне енергије биће..... **2,345 €/h**

$$P_{\text{гаџ}} = 2,364 \times 10^4 \text{ W} = 23,64 \text{ kW} - \text{снага турбине}$$

$$\eta_g = 0,8 - \text{степен корисности изабраног генератора}$$

$$23,64 \text{ kWh} \times 0,8 \times 0,124 \text{ €/kWh} = 2,345 \text{ €/h}$$

- Нето једночасовни приход од производње ел. енергије, тј. приход умањен за трошкове ангажовања запослених.....2,345 €/h - 1,46 €/h = **0,885 €/h**
- Дневни приход од производње ел. енергије.....0,885 €/h x 24 h = **21,24 €/dan**
- Исти приход на месечном нивоу.....21,24 €/dan x 30 dan = **637,2 €/mesec**

- **Период отплате уложених материјалних средстава и ресурса.....3 godine**

$$21.695 \text{ €} : 637,2 \text{ €/mesec} = 34,05 \text{ mesec} \approx \mathbf{35 \text{ meseci}}$$

$$35 \text{ meseci} : 12 \text{ meseci} = 2,92 \text{ godine} \approx \mathbf{3 \text{ godine}}$$

Ослањајући се на чињенице наведене у почетном делу овог рада да су у земљама ЕУ, 45% постројења старијих од 60, а 68% старијих од 40 година, несумњиво можемо закључити да је експлоатација и радни век ових електрана, уз адекватно и прописано превентивно, текуће и инвестиционо одржавање, изузетно дуг, те да је са тог аспекта **инвестирање у изложени и презентовани пројекат изузетно исплативо и економски утемељено и оправдано.**

7. ЗАКЉУЧАК

Током израде овог завршног рада прошао сам кроз све фазе истраживања развоја МХЕ, са поседним нагласком на:

- проучавању домаће и светске праксе у области енергетског коришћења малих водотокова,
- истраживању могућности да се коришћењем домаћих ресурса створе услови за брзо и јефтино пројектовање и градњу МХЕ,
- освајању поступака за брз, квалитетан и јефин прорачун и 3Д пројектовање МХЕ за сваку конкретну локацију у циљу што ефикаснијег искоришћавања расположивог хидроенергетског потенцијала,

Посебно ми је било стало да на основу конкретне документације коју сам развио у току израде овог рада, направим и један лабораторијски модел МХЕ (у овом случају тзв. Банкијеве турбине). То сам и урадио, и сада мислим да израђени модел може послужити и за постављање на конкретној локацији, ради производње електричне енергије за кућне потребе, што ћу, свакако, и урадити у наредном периоду.

Имао сам задовољство да у оквиру пројектног тима из предмета Хидрауличне и пнеуматске машине, заједно са својим колегама, започнем ову тематику, што ми је омогућило да израду овог завршног рада обавим ефикасно и без често неизбежних дилема које сваки развој, и свака конкретна конструкција ставља пред реализаторе.

8.ЛИТЕРАТУРА

- [1] Милун Ј. Бабић, Светислав Стојковић: Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Машински факултет Крагујевац. 1997. г.
- [2] Милослав Михајловић, *Мале Хидроелектране*, Београд 1995. год
- [3] <http://sr.wikipedia.org/srхидрауличнетурбине> (Приступљено сајту 5.07.2014.)
- [4]<http://www.obnovljivi.com/energija-vode/55-iskoristavanje-energije-vodotoka-u-energetici>(Приступљено сајту 8.07.2014.)
- [5]http://www.fmz.edu.rs/pages/05_arhiva/simpozijum/download/1_snrm_2011_zbornik.pdf(Приступљено сајту 18.07.2014.)
- [6] <http://www.tehnickaue.edu.rs/srp/cas/?conid=2319>(Приступљено сајту 18.07.2014.)
- [7] <http://www.dgt.uns.ac.rs/zbornik/issue41/32%20Prikaz%20Ivkov.pdf>(Приступљено сајту 18.07.2014.)
- [8] <ftp://is.fin.kg.ac.rs/Arhiva/radovi/5059.pdf> (Приступљено сајту 22.07.2014)
- [9] <http://www.tehnicka.edu.rs/vanredno-skolovanje/492.html>(Приступљено сајту 23.07.2014)
- [10] <http://www.tehnickaue.edu.rs/srp/cas/?conid=2322>(Приступљено сајту 23.07.2014)
- [11] http://sh.wikipedia.org/wiki/Male_hidroelektrane(Приступљено сајту 27.07.2014)
- [12] <http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/35/mhe%20-%202010.pdf>(Приступљено сајту 27.07.2014)
- [13] <https://www.google.rs/search?q=vodozahvat+turbine&safe>(Приступљено сајту 03.08.2014)
- [14] <https://www.google.rs/search?q=cevovod+turbine&safe=off&espv>(Приступљено сајту 03.08.2014)
- [15] <http://ees.etf.bg.ac.rs/predmeti/35/mhe%20-%202010.pdf>(Приступљено сајту 13.08.2014)
- [16] http://old.mf.edu.mk/system/files/HEC_D-Gerov%20final.pdf(Приступљено сајту 26.08.2014)
- [17] <http://www.dodaj.rs/f/Y/XJ/3YNlzkKo/uvod-i-fizicka-svojstva-.pdf>(Приступљено сајту 16.08.2014)
- [18] <ftp://is.fin.kg.ac.rs/Arhiva/radovi/4958.pdf>(Приступљено сајту 19.9.2014)