

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Милан П. Васић

Хидроелектране малих снага
мастер рад

Крагујевац, 2017.

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Методе прорачуна у развоју производа

Број индекса: 389/2015

Милан П. Васић

Хидроелектране малих снага

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Мирко Благојевић, ван. проф. - ментор**

2. _____

Датум одбране: _____

3. _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да да основне информације о хидроелектранама малих снага, као једном од најзначајних обновљивих извора енергије. Такође, потребно је да изврши пројектовање једне конкретне хидроелектране мале снаге, да димензионише виталне елементе овог сложеног система, да изврши анализу напонско-деформационог стања поменутих елемената.

На крају, потребно је да кандидат изврши техно-економску анализу пројектоване хидроелектране мале снаге.

Препоручена литература:

[1] Ивановић Д.: Хидроенергија, Подгорица, 2014.

[2] Бенишек М.: Хидрауличне турбине, Машински факултет Универзитета у Београду, 1998.

Крагујевац, фебруар 2017.

ментор:

др Мирко Благојевић, ван. проф.

РЕЗИМЕ

У овом раду описан је поступак израде прелиминарног пројекта хидроелектране мале снаге за одређену локацију. Детаљно су изложене и анализиране све савремене врсте хидроелектрана. Посебно је анализирана проточна хидроелектрана за коју је извршен детаљан избор компоненти. Велика пажња посвећена је провери напонског стања виталних машинких елемената нумеричким методама. У циљу бољег оцењивања пројектованог постројења урађена је економска анализа и план реализације пројекта.

Кључне речи: хидроелектране малих снага, проточне хидроелектране, избор компоненти, анализа напонског стања, економска анализа, план реализације пројекта.

SUMMARY

This work describes the procedure for the preparation of a preliminary low-power hydroelectric plant project for a specific location. All modern types of hydroelectric power plant have been analyzed in detail. Especially is analyzed flow hydroelectric power plant for which it was made detailed selection of components. Great attention was devoted to checking the voltage condition of vital machine elements by numerical methods. In order to better evaluate the projected plant, an economic analysis and project realization plan has been made.

Key words: hydroelectric plants of small power, flow hydroelectric power plants, selection of the components, voltage state analysis, economic analysis, project realization plan.

САДРЖАЈ

УВОД.....	1
1. ПОЈАМ И ДЕФИНИЦИЈА МАЛИХ ХИДРОЕЛЕКТРАНА.....	3
2. ВРСТЕ МАЛИХ ХИДРОЕЛЕКТРАНА.....	4
2.1 Акумулационе хидроелектране.....	4
2.2 Проточне хидроелектране.....	6
2.3 Реверзибилне хидроелектране.....	7
2.4 Хидроелектране на плиму и осеку.....	8
2.5 Хидроелектране на морским таласима.....	9
2.6 Хидроелектране уграђене у водоснабдевни систем.....	11
2.7 Хидроелектране унутар канала за наводњавање.....	12
3. ДЕЛОВИ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ.....	13
3.1 Брана или водојаж.....	13
3.2 Захват.....	14
3.3 Доводни органи.....	15
3.4 Затварачи и вентили.....	16
3.5 Разводник воде.....	17
3.6 Испуст (прелив).....	17
3.7 Одводни канал устава за оправке.....	17
3.8 Машинска зграда.....	18
3.8.1 Турбина.....	19
3.8.1.1 Пелтонова турбина.....	19
3.8.1.2 Франсисова турбина.....	20
3.8.1.3 Капланова турбина.....	21
3.8.1.4 Турго турбина.....	23
3.8.1.5 Банки турбина.....	23
3.8.1.6 Мала цевна турбина.....	24
3.8.1.7 Регулација турбина у хидроелектранама малих снага.....	25
3.8.2 Мултипликатор.....	25
3.8.3 Генератор.....	26
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ МАЛЕ СНАГЕ.....	28
4.1 Избор локације.....	28
4.2 Брана на Млави.....	30
4.3 Цевовод.....	31
4.4 Избор турбине.....	34
4.4.1 Радно коло.....	37
4.4.2 Лопатице радног кола.....	39
4.4.3 Силе на лопатицама радног кола.....	44
4.4.4 Кућиште радног кола.....	46

4.4.5 Спроводни апарат.....	47
4.4.6 Спирална уводна комора.....	48
4.4.7 Статор турбине.....	50
4.4.8 Криволинијски сифон.....	50
4.5 Избор генератора.....	51
4.6 Избор мултипликатора.....	52
4.7 Избор турбинског вратила.....	53
4.8 Машинска зграда.....	54
5. АНАЛИЗА ВРАТИЛА ТУРБИНЕ.....	56
5.1 Аналитички прорачун вратила.....	56
5.2 Прорачун вратила методом коначних елемената.....	57
5.3 Оптерећења и ограничења.....	59
5.4 Нумерички резултати.....	59
6. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА ПРОЈЕКТА.....	62
6.1 Трошкови изградње хидроелектране.....	62
6.2 Годишњи приход хидроелектране.....	63
6.3 Годишњи расходи хидроелектране.....	63
6.4 Оцена економске исплативости.....	64
7. РЕАЛИЗАЦИЈА ПРОЈЕКТА.....	65
ЗАКЉУЧАК.....	68
ЛИТЕРАТУРА.....	70
ПРИЛОГ.....	74

УВОД

Без енергије нема живота, а све већа употреба енергије представља опасност за нашу планету. Смањење угљендиоксида у атмосфери постао је глобални циљ за кога се удружено залаже све већи број држава.

Један од облика енергије који се свакодневно користи је електрична енергија. Она се највише добија сагоревањем фосилних горива у термоелектранама или природног и обогаћеног уранијума у облику метала и оксида у нуклеарним реакторима. Због ограничене количине ових ресурса, а и због значајног загађења Земљине атмосфере и животне средине јавља се потреба за новим, обновљивим изворима енергије. Један од таквих извора енергије је вода у речним коритима.

Енергија воде се користила хиљадама година за погон млинова и сличних постројења све до 1881. године када је на Нијагариним водопадима, односно на реци Фокс у држави Висконсин у САД-у направљена прва хидроелектрана. До 1896. године, постројење је успело да транспортује електричну енергију чак 26 миља даље од производног објекта, до Бафала, што до тада није било могуће. Велики део заслуга око овог подухвата припада Николи Тесли, чији споменик и данас стоји на острву Луна. Након овога, почела је изградња хидроелектрана у целом свету, [1].

Прва хидроелектрана у Србији је направљена на реци Градац код Ваљева 1900. године. Електрана је имала турбину снаге 20 KS која је покретала динамо машину снаге 12 kW. Енергија са ове електране је коришћена за освету Ваљева, [1].

Да је хидроенергетика у Србији нашла плодно тло за развој, најбоље се види кроз чињеницу да је практично још пре завршетка и пуштања у рад прве хидроелектране у Ваљеву, започета изградња нове на реци Ћетињи у Ужицу. Ова, друга хидроелектрана у Србији је већ уместо динамо машине имала трофазни генератор наизменичне струје, тј. користила је савремен Теслин полифазни систем учесталости 50 Hz, који је, уз одређена усавршавања, остао до данас у употреби у хидроенергетици. Хидроелектрана на Ћетињи пуштена је у рад 14. августа 1900. године, [1].



а)



б)

Слика 1 - Хидроелектрана "Под градом" у кањону реке Ћетиња
а) Почетком 20. века, [2]; б) Крајем 2013. године, [3];

Данас највећа хидроелектрана на свету је хидроелектрана Три кланца, на реци Јангце (трећој најдужој реци на свету) у Кини, са инсталисаном снагом од 22.500 MW, [4], док је највећа хидроелектрана у Србији, а тренутно 53. на свету, [5] Ђердап I, која се налази на реци Дунав, на изласку из Ђердапске клисуре, са инсталисаном снагом 1.026 MW на српској страни од укупне 2.254,8 MW, [6].



а)

б)

Слика 2 - Највећа хидроелектрана на свету и Србији

а) Хидроелектрана "Три кланца" са нормалним нивоом воде у резервоару 175m, [7];

б) Хидроелектрана "Ђердап I" са укупном грађевинском висином бране 55m, [8];

Према подацима из 2015. године, хидроелектране су произвеле 16,6% од укупне електричне енергије која се производи у целом свету и 70% од свих обновљивих извора електричне енергије, а очекује се раст од 3,1% за наредних 25 година, [9].

Укупна снага свих хидроелектрана у Србији износи 2.835 MW, што чини скоро 34% укупног електроенергетског потенцијала електро привреде Србије (ЕПС-а), [10].

1. ПОЈАМ И ДЕФИНИЦИЈА МАЛИХ ХИДРОЕЛЕКТРАНА

Мала хидроелектрана је постројење, које поред претварања енергије водотокова у електричну енергију, карактерише мања инсталисана снага, мања брана, мања количина воде у сливу. Сматра се да мале хидроелектране немају штетан утицај на околину, за разлику од великих хидроелектрана, чија се штетност описује кроз велике промене екосистема због изградње великих брана, утицаја на земљиште, поплава, утицаја на слатководни живи свет, повећане емисије метана и постојања штетних емисија у читавом животном циклусу хидроелектране које су углавном везане за период изградње, [11].

У свету не постоји јасна граница која дефинише категорију малих хидроелектрана - МХЕ. То је зато што на горњу границу МХЕ утиче већи број параметара као што су:

- ❖ степен привредног развоја земље,
- ❖ електроенергетска и електропривредна развијеност,
- ❖ расположиви и искористиви водни ресурси,
- ❖ природни услови топографије, геологије и др.,
- ❖ ниво развијености индустрије машиноградње, електроградње и хидроградње,
- ❖ богатство угљем, нафтиним дериватима и другим енергетским сировинама,
- ❖ величине и површина насеља, односно густина насељености.

Неке земље попут Португала, Шпаније, Ирске, Грчке и Белгије су прихватиле 10 MW као горњу границу инсталисане снаге. У Италији је граница 3 MW, у Шведској 1.5 MW, у Француској 8 MW, у Индији 15 MW. У земљама са изграђеним великим хидроелектранама и високом потрошњом, као што су Канада и САД, под малом хидроелектраном се подразумева електрана испод 30 MW, а у Кини испод 25 MW, [11].

Међутим, у Европи се све више прихвата горња граница до 10 MW и ту је границу подржало Европско удружење малих хидроелектрана (*European Small Hydropower Association - ESHA*), [11].

Према постојећем Закону о енергетици, у Србији се под малом хидроелектраном подразумева енергетски објекат за производњу електричне енергије инсталисане снаге до 10 MW, [12].

2. ВРСТЕ МАЛИХ ХИДРОЕЛЕКТРАНА

Зависно од природних услова, односно карактеристика кроз које протичу водотоци, развили су се и граде различити типови хидроелектрана. Према начину коришћења воде разликују се, [11]:

- ❖ акумулационе,
- ❖ проточне и
- ❖ реверзибилне хидроелектране.

Према начину смештаја самог постројења, разликују се, [11]:

- ❖ "класичне", на копненим водотоковима: рекама, потоцима, каналима и сл.,
- ❖ на морским таласима,
- ❖ на плиму и осеку.

Према паду водотока, односно висинској разлици између улазног пресека на брани и испуста, разликују се, [11]:

- ❖ нископритисне,
- ❖ средњопритисне,
- ❖ и високопритисне хидроелектране.

Према начину пуњења, односно величине акумулацијског језера хидроелектране могу бити, [11]:

- ❖ са дневном акумулацијом, код којих се акумулација пуни ноћу, а празни дању,
- ❖ са сезонском акумулацијом, код којих се акумулација пуни током кишног периода, а празни током сушног,
- ❖ и са годишњом акумулацијом, код којих се акумулација пуни током кишних, а празни током сушних година.

Према удаљености машинске зграде од бране, разликују се, [11]:

- ❖ прибранске хидроелектране, чија је машинска зграда смештена непосредно уз брану,
- ❖ деривацијске хидроелектране, чија је машинска зграда смештена даље од бране.

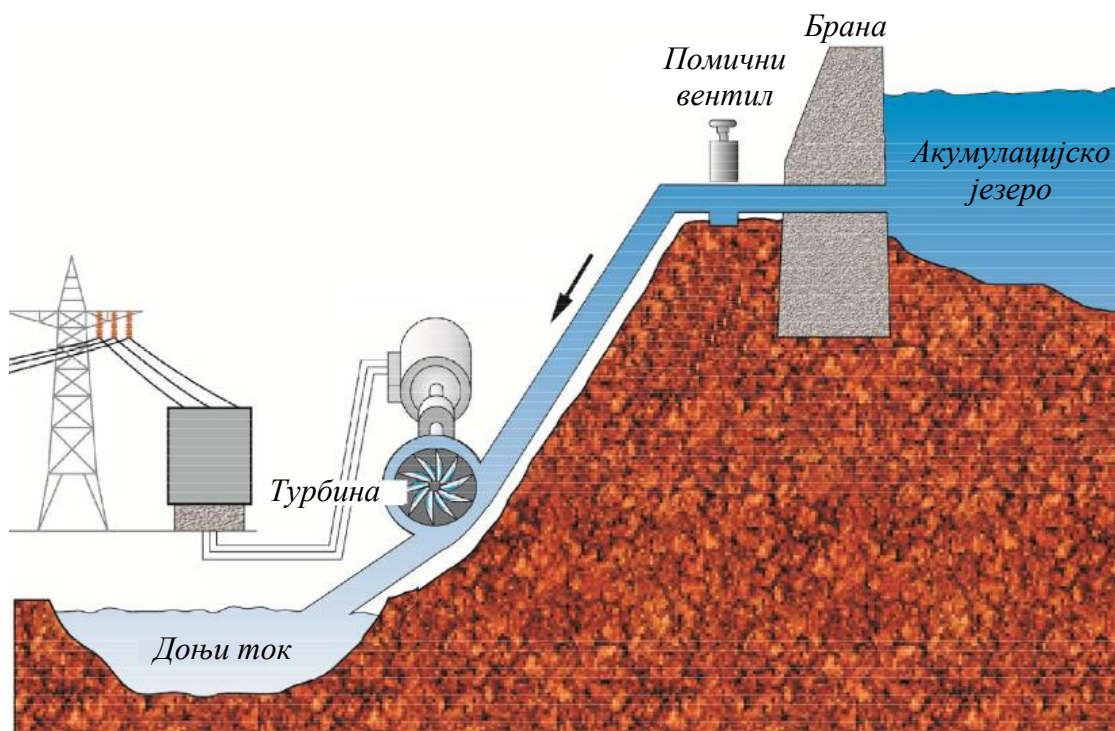
Према смештају машинске зграде, разликују се, [11]:

- ❖ надземне хидроелектране, код којих је машинска зграда смештена изнад тла,
- ❖ подземне, код којих је машинска зграда смештена испод тла.

2.1 Акумулационе хидроелектране

Акумулациони систем је најчешће коришћен систем рада. Добра страна овог система је акумулирање јефтиног извора енергије кога има у изобиљу и планирање потрошње по потреби. Снага акумулацијске хидроелектране зависи од висине воденог стуба између површине воде у акумулацијском језеру и одвода који се налази после водене турбине.

Код малих хидроелектрана се не практикује изградња великих резервоара или акумулација као код великих хидроелектрана, јер је цена изградње релативно велике бране прескупа и економски неисплатива. Међутим, уколико је велика акумулација изграђена за друге сврхе, као што су прикупљање воде за велике градове, наводњавање, заштита од поплава, рекреацијска подручја итд, могуће је тада производити електричну енергију користећи одвод или природни ток воде из акумулације.



Слика 3 - Шема акумулационе хидроелектране, [13]

Заустављена вода, која је на знатно вишем нивоу од реке, пролази кроз контролна врата на брани (улазни пресек) и доводи се до турбине каналима, тунелима или цевима под нагибом, под утицајем гравитационе силе. Постоје две могућности уласка воде у систем, улазак на површини и улазак испод површине. Уколико је ниво воде константан, улаз се изводи на површини, док се испод површине и то у најнижој могућој висини изводи у случају када се ниво воде током године значајно мења.

На крају доводног канала, налази се водена комора, и њено димензионисање има велики утицај на правилно функционисање водене турбине, која представља погонски уређај у којем се потенцијална енергија воде претвара у кинетичку енергију, а затим променом количине кретања у радном колу, претвара у механичку енергију обртања вратила турбине. Обртањем вратила турбине у статору генератора се индукује електромоторна сила.

Број обртаја турбине се повећава коришћењем мултипликатора који је спојен са турбином на улазу и генератором на излазу. Произведена електрична енергија се помоћу трансформатора повећава на потребан напон наизменичне струје како би се смањили губици преноса електричне енергије, а искоришћена вода се цевоводима враћа у доњи ток водотока. Ова вода је јако обогаћена кисеоником, и рибе се радо задржавају у овом подручју.

2.2 Проточне хидроелектране

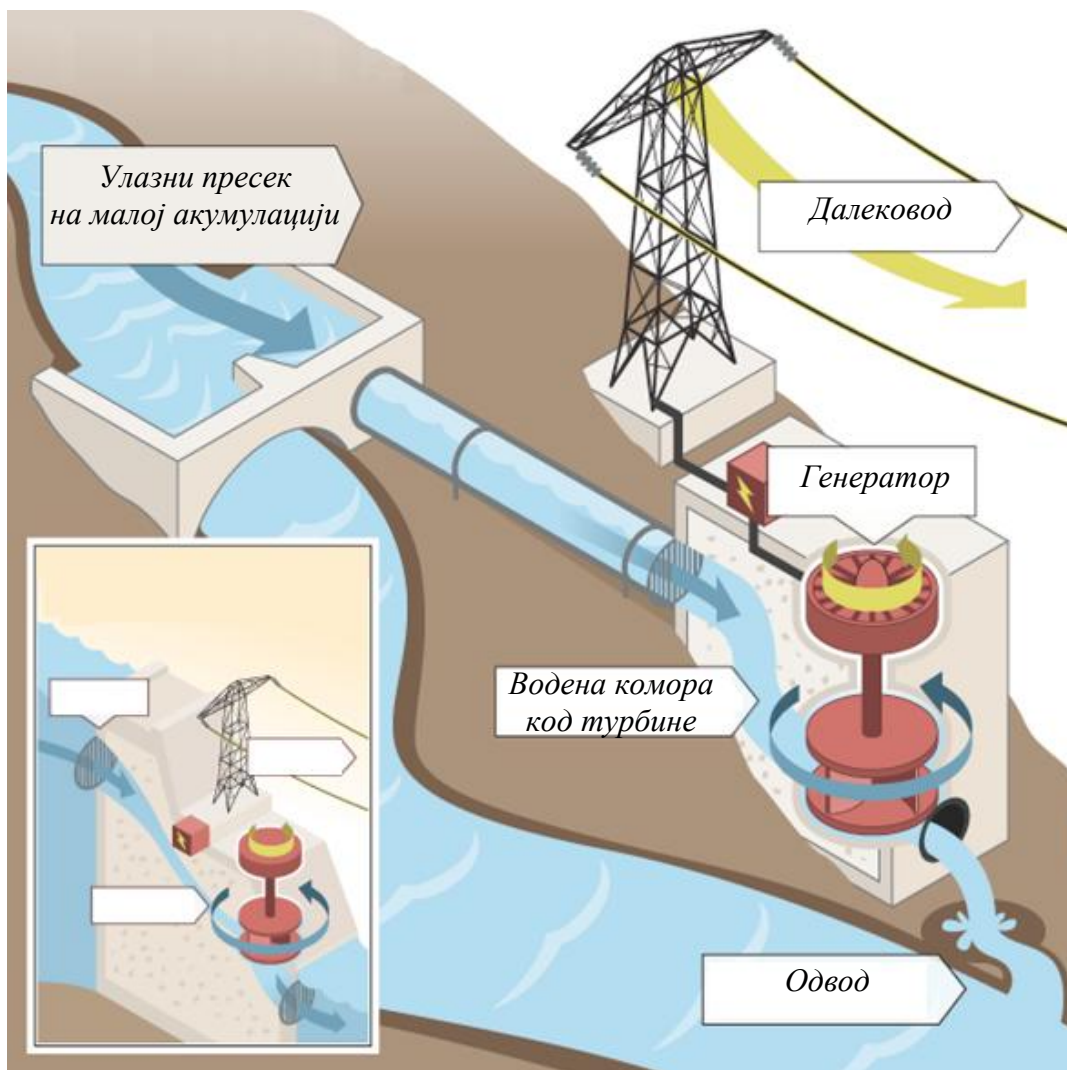
Код проточних система турбина је директно постављена уз реку и делимично или у потпуности користи ток реке или се стварају мање акумулације, које се штите уградњом мањих брана, а узводна акумулација се може испразнити за мање од два сата рада. У великој мери су зависне од расположивог воденог тока. Зато се и граде на рекама које имају константан проток током целе године.

Предности проточних хидроелектрана су, [13]:

- ❖ имају мали утицај на околину за време оптерећења мреже,
- ❖ не ствара се акумулирана вода и вода не мења свој природни ток,
- ❖ није потребно расељавање околног становништва јер не долази до поплава.

Недостаци проточних хидроелектрана, [13]:

- ❖ због тога што имају мали водени капацитет или уопште немају, не могу задовољити укупну потражњу коју мрежа захтева,
- ❖ зависно од природног тока реке, немају константну производњу електричне енергије током целе године.



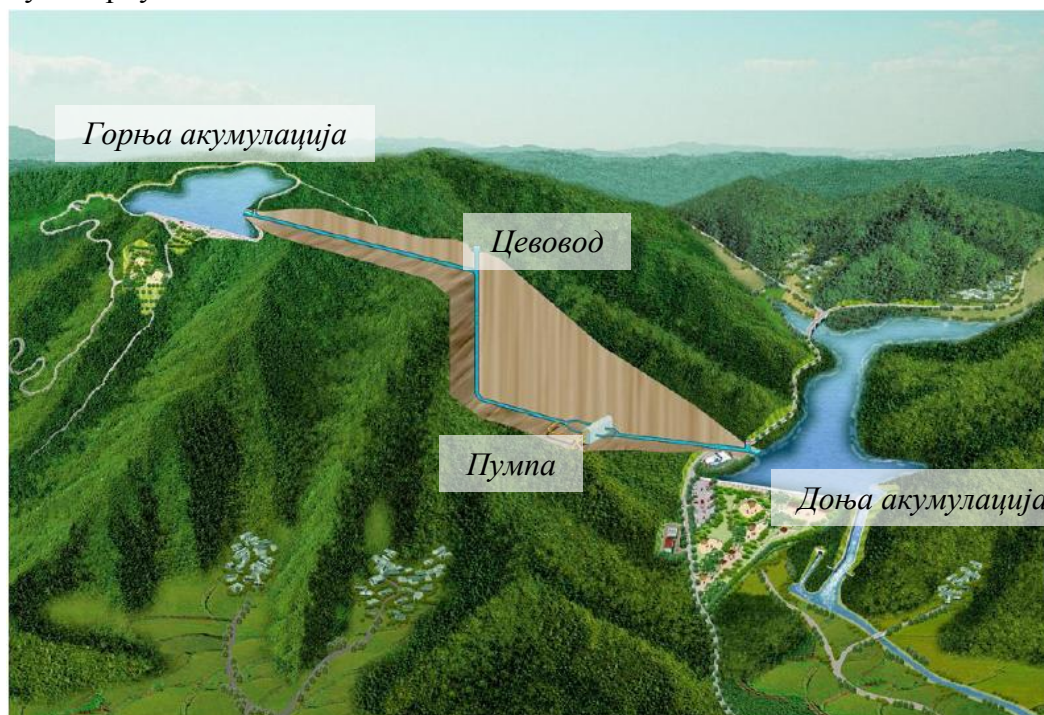
Слика 4 - Шема проточне хидроелектране, [13]

2.3 Реверзибилне хидроелектране

Реверзибилне хидроелектране су по конструкцији сличе акумулационим хидроелектранама. Оне осим што производе електричну енергију из воде као и свака друга хидроелектрана, ту исту воду могу пумпати у доба када је то најисплативије, јер имају два складишта водене масе, односно горње и доње акумулацијско језеро.

Горње акумулацијско језеро је исто као код класичних хидроелектрана. Градњом бране осигурава се акумулација воде, али се пуни пумпањем воде из ниже у вишу акумулацију у доба ниске потражње електричне енергије у енергетском саставу неке земље или услед високог водостаја. Већом потражњом за електричном енергијом вода се пушта натраг из горње у доњу акумулацију па тек сада пролази кроз турбину при чему се производи електрична енергија.

Постоје две врсте оваквих постројења, [14], од којих је једно такво да су акумулације повезане са једним цевоводом у коме се налази реверзибилна турбина која има могућност прилагођавања режиму рада, тј. може радити и као пумпа и као турбина, зависно од тога да ли треба пумпати воду у горњу акумулацију или производити електричну енергију повратком воде из горње у доњу акумулацију. У таквим постројењима се најчешће уграђује Францисова турбина. Друга могућност је спајање горњег и доњег акумулацијског језера са два цевовода кроз које се се врши посебно пумпање и враћање воде те се тако избегава примораност промене режима из пумпе у турбину и обрнуто.



Слика 4 - Шема реверзибилне хидроелектране, [14]

Потреба за развојем овакве врсте хидроелектране јавља се са жељом за стабилизацијом електроенергетског система у коме се жели контрола производње електричне енергије, тј. са жељом да се највише електричне енергије производи онда када су највећи захтеви за њом и да се тако избегну вишкови производње који се морају одбацити.

Са друге стране, овакво складиштење енергије није идеално узимајући у обзир губитке приликом претварања енергије, губитке струјања воде кроз цевовод, губитке на електромоторима и генераторима пумпе и турбине, као и губитке услед испаравања акумулиране воде. Максималан степен претварања енергије и враћања те енергије варира од 70 до 85% зависно од врсте извођења, врсте акумулацијских језера и услова рада. Тај степен претварања још више пада уколико се изгради отворено горње акумулацијско језеро.

Систем са пуњењем воде у горњи акумулацијски резервоар је изведен први пут 1890. године у Швајцарској и Италији, али се значајан помак у овом подручју направио тек 1930. године када су изграђене реверзибилне турбине са високим степеном искоришћења. Врхунац данашње технологије у постројењима су пумпе промењивих брзина окретања које се прилагођавају (синхронизују) фреквенцији мреже када производе електричну енергију.

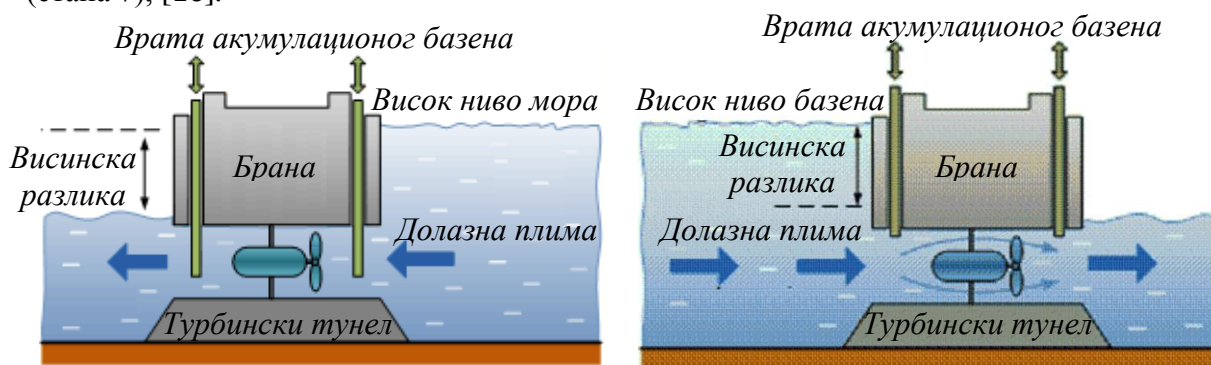
2.4 Хидроелектране на плиму и осеку

Енергија плиме и осеке спада у облик хидроенергије, која кретање мора, узроковано морским менама или падом и порастом нивоа мора, користи за трансформацију у електричну енергију. За сада још нема већих постројења, али потенцијал није мали. Енергија плиме и осеке има потенцијал за стварање електричне енергије у одређеним деловима света, односно тамо где су морске мене изразито наглашене. Морске мене су предвидљивије од енергије ветра и соларне енергије. Тај начин производње електричне енергије не може покрити светске потребе, али може дати велики допринос у обновљивим изворима енергије. На појединим местима обале у западној Француској и у југозападном делу Велике Британије амплитуда достиже и више од 12 m. За економичну производњу је потребна минимална висина од 7 m. Процењује се да на свету постоји око 40 локација погодних за инсталацију плимних хидроелектрана, [11].

У зависности од принципа рада, постоје две групе електрана на плиму и осеку. Прва група користи разлику хидростатичког притиска између базена и мора (конвекционе), док друга користи кинетичку енергију воде која се креће (електране на морске струје), слично као код ветрогенератора, [15].

Принцип рада конвекционе хидроелектране се може поделити по етапама (слика 5.). У првој етапи су затворена врата и вода у акумулационом базену остаје на одређеној висини, а ниво мора опада. Када ниво мора постане толико низак да постоји довољна разлика кота (односно довољан пад) за погон турбине, турбина се пушта у погон (етапа 2 - пражњење базена) па се тако потенцијална енергија воде нагомилане у базену претвара у механичку, а механичка у електричну енергију, све док разлика пада омогућава рад турбине. Турбина се зауставља када се постигне минимални пад, али се базен након тога и даље празни (етапа 3) кроз врата, да би се у њему постигао што нижи ниво, како би се остварио што већи пад за етапу погона у обрнутом смеру. Када се изједначе нивои у базену и мору, почиње црпљење воде из базена у море (етапа 4) да

би се што више снижио ниво воде у базену. Када се постигне кота која одговара најнижој коти мора, обуставља се рад пумпе, па базен остаје на константном нивоу (етапа 5) све док се не постигне такав пад код којег ће турбина моћи да ради у обрнутом смеру. Након тога ставља се турбина у погон користећи воду из мора према базену (етапа 6) све док се не постигне минималан пад код којег турбина може радити. Затим се турбина зауставља, отварају се врата да би се даље пунио акумулацијски базен (етапа 7), [16].



Слика 5 - Шема конвекционе хидроелектране на плиму и осеку, [17]

Рад хидроелектране на морске струје је потпуно другачији и он се своди на коришћење кретања водених масе за покретање елисе која је преко преносника повезана са генератором. Када је густина воде скоро 800 пута већа од густине ваздуха врло мало струјање водене масе произвешће исту количину енергије као и ураган на копну. Модел подводних турбина применљив је на било којој локацији на којој постоје морске струје. Цело постројење се налази на морском дну па је невидљиво због постављања на минималној дубини од 50 m, да систем не представља препреку за нормалну пловидбу. Ротација елисе је спора па не постоји опасност од негативног деловања на морске организме. Осим тога, највећа брзина кретања у мору је 2 до 3 m/s, па оваква хидроелектрана може 4 пута више произвести електричне од класичне ветротурбине, [18].



Слика 6 - Различита конструкциона решења хидроелектране на морске струје, [19]

2.5 Хидроелектране на морским таласима

Хидроелектране на таласима су хидроелектране које користе енергију таласа за производњу електричне енергије. Енергија таласа је обновљив извор енергије. То је енергија узрокована највећим делом деловањем ветра по површини океана. Снага

таласа се разликује од дневних морских мена плиме/осеке и сталних циркуларних океанских струја.

За коришћење енергије таласа, потребно је одабрати локацију на којој су таласи довољно чести и довољне снаге. Та снага варира зависно од географског положаја, од 3 kW/m на Медитерану до 90 kW/m на Северном Атлантику, [11].

Ови пучински системи постављају се на отворено море где је дубина већа од 40 m. Користе се различити сложени механизми код којих се један део помиче у односу на други, а најзначајнији су, [11]:

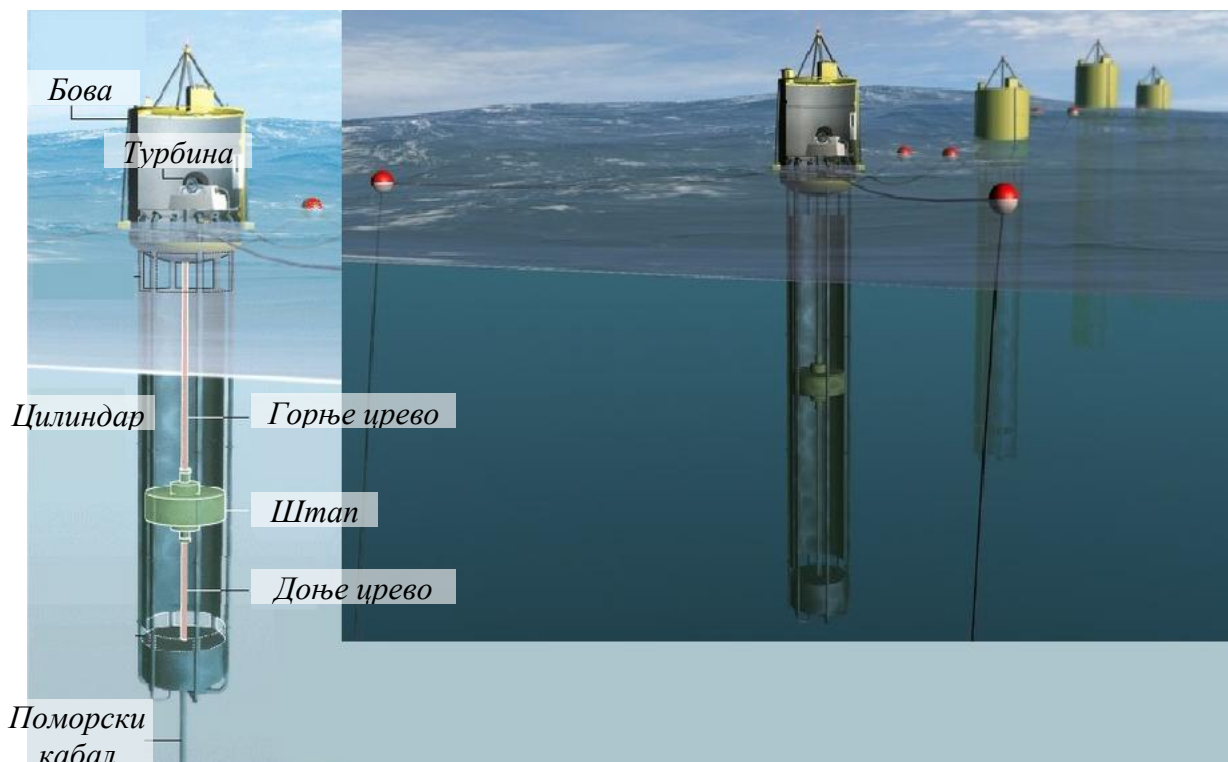
- ❖ Единбуршка (Салтерова) патка. Основни део овог уређаја је пловак, ефикасног хидродинамичког облика, који подсећа на рудиментарну патку (одатле и назив). Пловак, постављен у смеру кретања таласа, подиже се и спушта, делујући као разбијач таласа. При подизању и спуштању на таласима, тело пловка помиче се у односу на цилиндричну осу, смештену у његовом задњем делу, закрећући је увек у истом смеру. Тај ефекат погони пумпе које терају радни флуид (високопритисно уље) на турбину, а она погони електрични генератор. Низ, састављен од више пловака, поставља се тако да заједничка флексибилна цилиндрична "кичма" буде што више паралелна надолazeћим таласима. Уређај треба бити лабаво усидрен, тако да се спречи усмерено заношење морском струјом, али не и кретање потребно за претварање енергије. Прилико наилаaska таласа, сваки пловак се креће засебно. Прикупљање и одвођење енергије из пловка, који се у различитим фазама крећу, изузетно је захтеван задатак.



Слика 7 - Салтерова патка, [20]

- ❖ AquaBuOY бове. Америчка компанија *Renewables* започела је пројекат пучинских постројења, са планом инсталирања у *Makah Bay* (Вашингтон,

САД). Реч је о пантетирању претварача енергије таласа, назива *AquaBuOY*, који се темељи на технологији бова. Бове *AquaBuOY* постављају се на пучину, неколико километара од обале, на месту највеће енергије таласа. Вертикално кретање таласа користи се, помоћу двотактне цревне пумпе, за притискивање воде и погоњење турбине, а турбина погони електрични генератор. Произведена електрична енергија се подводним каблом преноси до обале. Постројење је модуларно: може бити сачињено од неколико бова *AquaBuOY* па до стотина бова комбинованих у различит распоред, према жељеној излазној снази.



Слика 8 - *AquaBuOY* бове, [21]

Генерисање снаге из таласа тренутно није широко примењена комерцијална технологија, иако су постојали покушаји њеног коришћења још од 1890. године.

2.6 Хидроелектране уграђене у водоснабдевени систем

Данас се све чешће мале хидроелектране уграђују у систем за водоснабдевање града. Наиме, вода за пиће се испоручује у град транспортом воде из повишеног резервоара кроз цевовод под притиском. У таквим врстама инсталације на нижем крају цевовода, тј. на уласку у постројење за прочишћавање воде, губитак енергије воде се ублажава коришћењем специјалних вентила. И зато је постављање турбине на крају цевовода потпуно оправдано, с обзиром да ће и онако изгубљену енергију моћи претворити у електричну, уз услов да се избегне хидраулични, односно водени удар. Ради обезбеђивања трајног снабдевања водом мора бити уграђен систем обилазних вентила. Код неких система за водоснабдевање турбина има испуст у отворени базен

или језеро, где систем за контролу одржава ниво воде у њему, чак и у случају механичког застоја или застоја турбине. Када главни обилазни вентил испадне из погона појављује се предпритисак, тако да се помоћни обилазни вентил одмах отвара. Контролни системи су још сложенији за случај кад је излаз из турбине подвргнут противпритиску водене мреже, [11].

2.7 Хидроелектране унутар канала за наводњавање

Хидроелектрана се може поставити и унутар канала за наводњавање. Постоје две могућности за извођење оваквог постројења, [11].

Уколико канал не постоји, за правилно функционисање постројења потребно је пројектовати канал истовремено када и постројење. Канал мора бити довољно велик за смештај улазног пресека, машинске зграде и одвода, а токође мора да обезбеди и воду за наводњавање. Систем мора да садржи и бочно обилажење у случају гашења водене турбине.

Када канал већ постоји, онда би он требало незнатно да се повећа за смештај улазног пресека и прелива. Да би се ширина улазног пресека редуковала на минимум, уграђује се издужени прелив, и вода се затим од улазног пресека до турбине доводи кроз притисни цевовод, па се кроз кратак одвод враћа у канал, тако да у каналима углавном нема миграције рибе.

3. ДЕЛОВИ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ

Грађење хидроелектране малих снага није једноставан задатак, јер треба узети у обзир велики број пословних, инжењерских, финансијских, правних и административних аспеката у различитим развојним фазама, почев од избора места градње, па све до оперативне фазе хидроелектране.

При изради малих хидроелектрана, неизоставан део су њена грађевинска, машинска и електро опрема, чија конструкција зависи од типа хидроелектране, локалних услова, доступности грађевинског материјала итд.

Рентабилно коришћење хидроенергије у Републици Србији се своди на изградњу малих акумулационих или проточних хидроелектрана. Овакве хидроелектране се најчешће састоје од, [22]:

- ❖ бране и водојаже,
- ❖ захвата,
- ❖ водостана или водене коморе,
- ❖ испуста и прелива,
- ❖ канала,
- ❖ тунела,
- ❖ цевовода под притиском,
- ❖ машинске зграде.

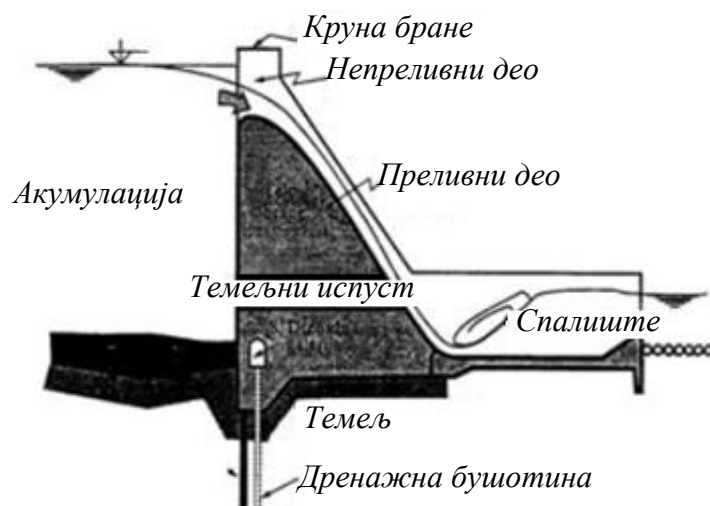
3.1 Брана или водојажа

Основни грађевински елемент код хидроелектрана је брана (водојажа), чија је главна намена као и преграде, односно насипа, да подиже и одржава воду на жељеној висини, допуштајући да се сувишна вода прелива преко ње или преко посебног прелива у близини. Поред тога, брана смањује брзину воде у отвореном току и тиме смањује отпоре трења у водотоку испред турбине и омогућава таложење песка.

Код малих хидроелектрана се не практикује изградња великих резервоара или акумулација као код великих хидроелектрана, јер је цена изградње релативно велике бране прескупа и економски неисплатива. Према ICOLD (*International Committee of Large Dams*), [23], брана се сматра „малом“ када јој је висина, мерена од темеља до врха мања од 15 m.

Бране могу бити изведене у веома различитим облицима, али све имају исте делове, који се у зависности од конструкције примењују на појединим типовима малих хидроелектрана. На слици 9 приказани су главни делови бране и то, [22]:

- ❖ тело бране - које зауставља воду и ствара успор, а састоји се од лица, леђа и круне (врха) бране,
- ❖ темељ - део на коме је брана подигнута, а који се налази испод речног корита, па се због оптерећења тла, гради знатно шире од бране,
- ❖ слапиште - део бране у који вода пада после преливања преко круне,
- ❖ везе са обалом.



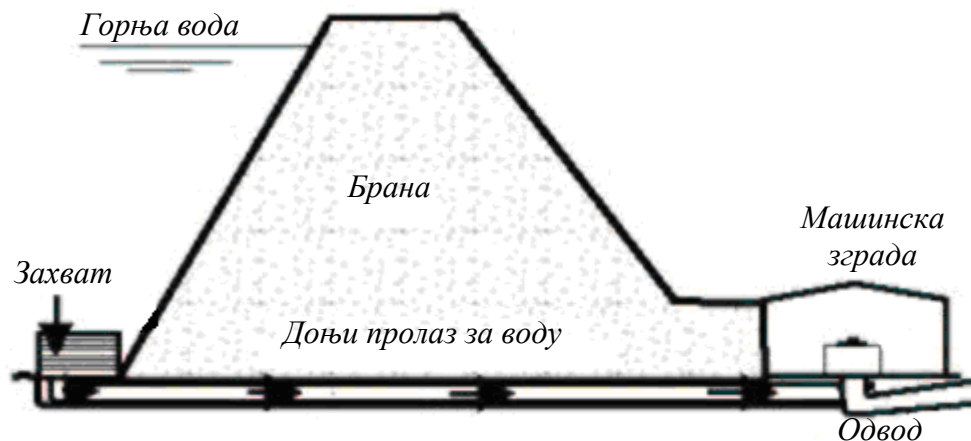
Слика 9 - Делови бране, [22]

Према покретљивости, бране могу бити, [22]:

- ❖ сталне - праве се тако да целом ширином буду непокретне, а сувишна вода се одводи преко посебних прелива и испуста. Формирају се насипом земље или камена (данас ретко) или од армираног бетона.
- ❖ покретне - по целој ширини бране, вршећи притом транслаторно или ротационо кретање. израђују се од дрвета или металне конструкције.
- ❖ комбиноване - на једном делу ширине реке је непокретна, а на осталим деловима покретна. Израђују се од комбинованих материјала.

3.2 Захват

Захватом се назива онај део хидропостројења који служи за хватање и довођење воде из реке или језера у доводни канал, тунел или код сасвим малих падова, непосредно у турбину. Задатак захвата је да задржи лед, дрво, шљунак, песак и друге наносе испред улаза, а ако су већ прошли у захват да их издвоји и спречи њихов одлазак у доводне органе. Постоје многа конструкциона решења захвата.



Слика 10 - Шематски приказ довода воде до машинске зграде, [22]

3.3 Доводни органи

Довођење воде од захвата до улаза у турбину може бити изведено на најразличитије начине. Типични и најчешће употребљавани начини довођења воде од захвата до улаза у турбину су, [22]:

- ❖ довођење отвореним или затвореним каналом са слободном површином воде,
- ❖ довођење кроз цев под притиском или кроз тунел,
- ❖ довођење без канала и без цеви, непосредно из реке у турбину.

Између основних начина довођења воде постоји много других прелазних облика са применом сифона, аквадукта, помоћних резервоара и сл. Тако се, нпр., вода може довести каналом или тунелом до неке тачке, а да се од ње даље води помоћу цеви под притиском. Који ће се начин довођења воде усвојити зависи с једне стране од величине протока и укупног пада, а с друге стране од околног терена, односно од општег решења хидропостројења. У сваком случају доводни органи треба да испуне следеће услове:

- ❖ да не пропуштају воду,
- ❖ да су губици у њима најмањи уз одговарајућу економичност грађења,
- ❖ да имају што дужи век трајања,
- ❖ да захтевају минимално одржавање.



а)



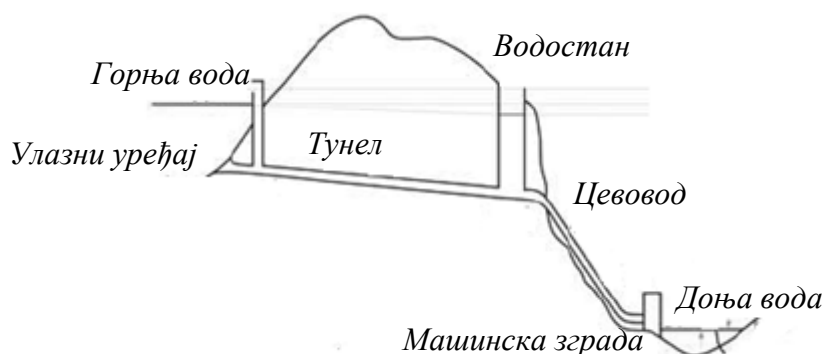
б)

Слика 11 - Доводни органи

а) Отворени канал, [22]; б) Цевовод, [22]

У случајевима када се цевовод под притиском поставља директно на крај тунела, при наглим променама, код отварања или затварања протока настаје пораст или пад притиска. Ова појава се назива хидраулични удар и веома је опасна, јер може довести до хаварија на целокупној инсталацији.

У ту сврху се на крају тунела, а на месту споја тунела са притисним цевоводом поставља специјална хидротехничка грађевина - водостан, која има улогу да пораст притиска који настаје наглим затварањем турбине ограничи на релативно ниску вредност. Талас повећаног притиска у цевоводу, који настаје услед воденог удара, одбија се од слободне површине у водној комори, која зауставља његово ширење у тунелу. У цевоводу престаје кретање воде, али због инерције ће се у тунелу наставити, што изазива подизање нивоа воде у водној комори. Овај пораст нивоа ће се задржати све док се не заустави кретање воде у тунелу. На слици 12 је приказана шема хидроелектране са водостаном, [22].



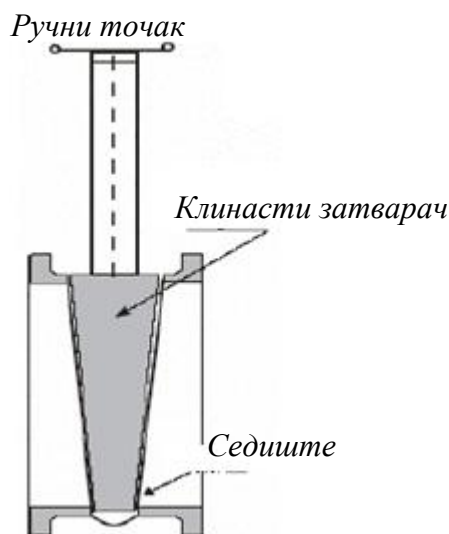
Слика 12 - Систем са водостаном, [22]

3.4 Затварачи и вентили

У свакој малој хидроелектрани потребно је омогућити да се нека компонента, због одржавања или поправке привремено изолује. Неки од затварача и вентила одговарају захватима за мале хидроелектране чији системи обухватају следеће, [22]:

- ❖ прекидаче протока направљени од хоризонтално постављених греда,
- ❖ клизне капије од ливеног гвожђа, челика, пластике или дрвета,
- ❖ ламелне капије са или без противтега,
- ❖ кугласти, ротациони, чаурасти - тип, лептирасти и сферни вентил.

Клизни затварачи се углавном користе за контролу протока кроз отворене канале или друге сличне конструкције ниског притиска, а клизни затварачи од ливеног гвожђа се углавном користе за отворе мање од 2 m^2 . За веће отворе, конструкције челичних клизних затварача су јефтиније и флексибилније. Клизни затварачи се ретко користе код цевовода под притиском јер им је потребно више времена за затварање, зато што чеп клизи између две вођице унутар затварача. Када се користи у цевоводу високог притиска, притисак воде гура чеп од свог седишта, тако да вентил тешко ради. Овај проблем се превазилази одабиром чепа клинастог облика.



Слика 13 - Затварач облика клина, [22]

3.5 Разводник воде

Грађевина подигнута на месту где вода прелази из доводног органа у турбински улаз зове се разводник воде. Он служи најпре за пропуштање воде у турбину, а затим и за регулисање нивоа воде тј. пада који се користи у турбини. Разводник је обично шири и дубљи од доводног канала да би се у њему таложио песак и муљ који су прошли кроз доводни канал. Разводници се израђују на више начина и међусобно се разликују према облику, величини, положају и начину дејства.

Две основне групе разводника су, [22]:

- ❖ разводници са слободном површином воде,
- ❖ разводници за доводе под притиском.

3.6 Испуст (прелив)

Оштећење или пробијање бране може да има озбиљне последице на терен низводно од бране. Током радног века бране, река тече у најразличитијим условима, а брана треба да одговори на све те промене па се из тог разлога пажљиво пројектују пролази за вишак воде и представљају саставни део брана и захвата. Ови пролази се називају испусти односно преливи. Ако сама брана није предвиђена као преливна или покретна, онда се у њеној близини изграђују помоћни преливни уређаји за одвођење сувишне воде, помоћни уређаји за чишћење талоба испред бране, пролази за рибе и сл. Најуобичајенији облик прелива - испуста је гравитациони (Слика 14).



Слика 14 - Гравитациони прелив, [22]

3.7 Одводни канал устава за оправке

Вода која истиче из турбине одлази у речно корито или непосредно или кроз одводни канал који почиње од сифона турбине. Одводни канал се може изградити као отворен или као затворен канал са слободном површином воде или као тунел.

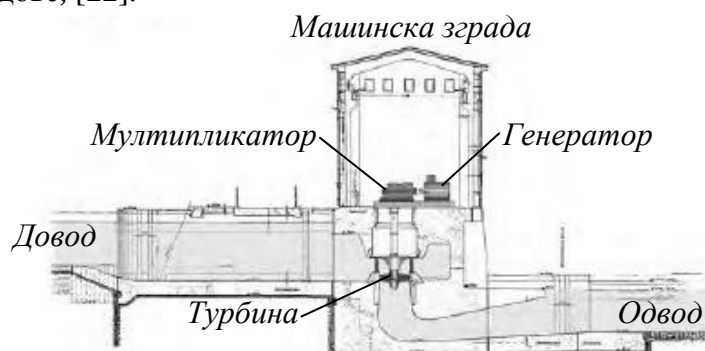
Ако је одводни канал ископан у земљишту које вода лако односи, после извесног времена може се десити да вода продуби корито канала те ће ниво воде у њему за време ниског водостаја опасти испод предвиђене границе. Таква појава доводи до продирања ваздуха у сифон услед чега снага турбине нагло опада.

3.8 Машинска зграда

Машинска зграда се поставља при крају речне деонице коју хидропостројење користи. Свако хидропостројење има другачију машинску зграду, јер њен облик зависи од многих чинилаца као што су: врста, број и величина турбинских агрегата, облик околног терена, квалитет земљишта, величина и положај, уређај за регулисање односно затварање турбине, и др.

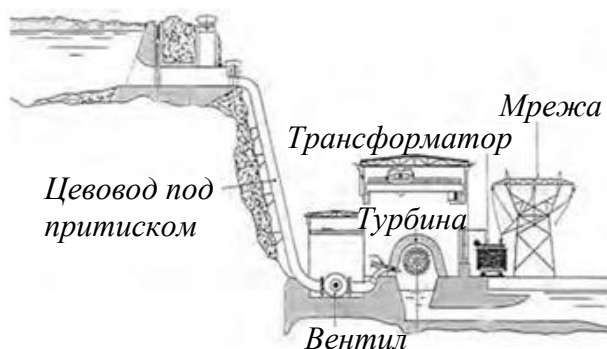
Као што је означено на сликама 15 и 16, у машинској згради је следећа опрема: улазни затварач или вентил, турбина, мултипликатор, генератор, системи контроле, кондензатор, прекидач, заштитни систем, трансформатори и сл.

На слици 15 је шематски приказ интегрисаног захвата у машинској згради погодног за мале падове, [22].



Слика 15 - Шематски приказ једне машинске зграде -ниског пада, [22]

У средње и високе шеме падова, машинске зграде су обичне као на слици 16, са улазом за цевовод и одводним каналом. Иако није уобичајено, ова врста електрана може бити подземна, [22].

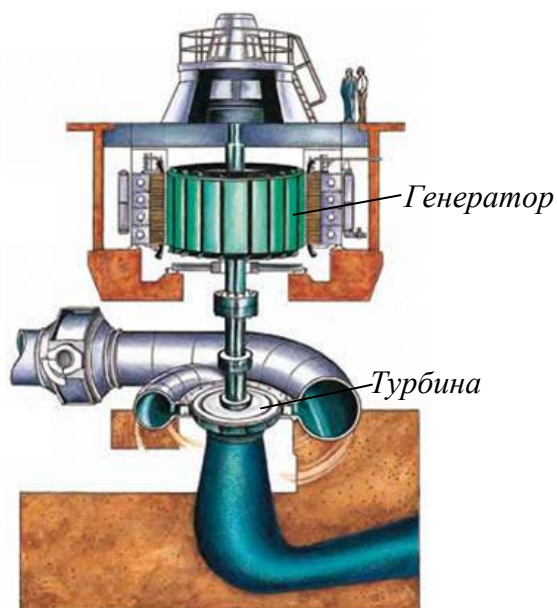


Слика 16. Шематски приказ једне машинске зграде високих и средњих падова, [22]

Машинска зграда мале хидроелектране се своди практично на само једну просторију са агрегатом. У циљу што веће рационализације постројења, за смештај агрегата се могу користити и већ постојећи адаптирани објекти (зграде напуштених воденица и сл.).

Агрегат хидроелектране малих снага чине, [22]:

- ❖ турбина,
- ❖ генератор,
- ❖ командни орман,
- ❖ регулатор.



Слика 17 - Агрегат хидроелектрана малих снага, [22]

3.8.1 Турбина

За покретање генератора у хидроелектранама малих снага користе се различити типови турбина. Оне се могу поделити према више критеријума, међутим основна подела турбина је према начину рада, тј. према начину конвертовања енергије водног тока у корисну механичку енергију на вратилу радног кола и то на аксијалне и реакцијске турбине.

Аксијалне турбине користе кинетичку енергију млаза за генерисање снаге на вратилу радног кола. Сличне су воденом точку, имају удубљене лопатице које нису потопљене у води, већ се окрећу у ваздуху. Представници ове врсте турбина су Пелтонова, Турго и Банки турбина.

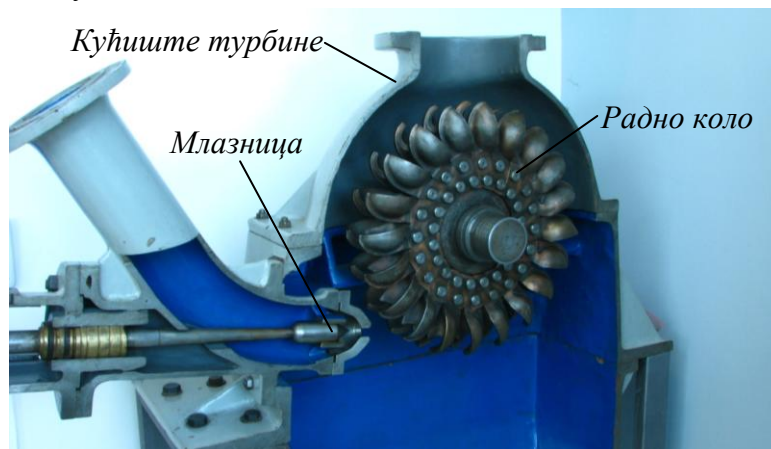
Реакцијске турбине користан рад остварују на рачун пада притиска кроз турбину. Конструкција ових турбина је изведена тако да вода, изашавши из спроводног елемента, не долази у додир са ваздухом и због тога у радно коло улази са надпритиском. Лопатице ових турбина су сличне бродским пропелерима, а сама радна кола се налазе у кућишту које је потпуно испуњено водом. Представници реакцијских турбина су: Франсисова турбина, Капланова, радијална, аксијална и друге.

У наставку ће бити приказане специфичне карактеристике ових турбина када се оне користе код хидроелектрана малих снага.

3.8.1.1 Пелтонова турбина

Пелтон турбине су погодне за водотокове са већим падом и мањим протоком. Одликују се високим степеном искоришћења. Димензије радног кола и број млазница, који се креће од 1 до 4, зависи од карактеристика посматраног водотока. Радно коло се

обично састоји од 12 до 14 лопатица, а свака је оштром ивицом подељена у два једнака овална дела. Овакав облик лопатице "реже" млаз воде у два дела, од којих сваки напушта лопатицу под углом од готово 180° , [22].



Слика 18 - Пелтон турбина, [24]

У табели 1. су дате карактеристике Пелтон турбине за различите падове, где је n_s специфична брзина обртања турбине.

Табела 1 - Карактеристике Пелтон турбине за различите падове, [22]

$n_s [min^{-1}]$	Врста турбине	Користан пад Н [m]
Од 10 до 35	Пелтонова са једном млазницом	Од 1800 до 300
Од 10 до 45	Пелтонова са две млазнице	Од 800 до 100
Од 10 до 75	Пелтонова са четири млазнице	Од 400 до 100

3.8.1.2 Франсисова турбина

Франсис турбине могу да се користе на водотоковима са средњим протоком и падом од 15 m до 700 m. За разлику од великих хидроелектрана, где се по правилу ове турбине постављају са вертикалним вратилом, код хидроелектрана малих снага Франсисова турбина се поставља и са хоризонталним вратилом, [22].



Слика 19 - Франсисова турбина, [25]

Конструишу се за сваку локацију посебно, како би се постигао висок степен искоришћења, који износи преко 90%. Франсисове турбине у односу на Пелтонове исте снаге, имају већи степен искоришћења и већу повољну брзину обртања, па из тих разлога ове турбине покрећу мање и јефтиније генераторе, што је посебно значајно код хидроелектрана малих снага.

Састоје се од спиралне уводне коморе, статорских лопатица, радног кола, дифузора и лежајева.

У табели 2 дата је подела Франсисових турбина према специфичној брзини обртања и опсег њихове примене у погледу расположивог пада.

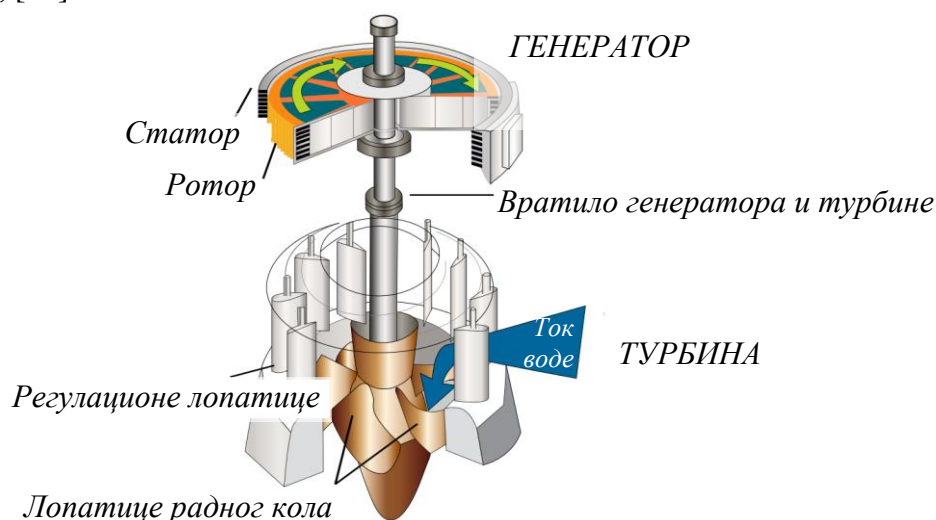
Табела 2 - Карактеристике Франсисове турбине за различите падове, [22]

$n_s [min^{-1}]$	Врста турбине	Користан пад $H [m]$
Од 70 до 120	Франсисова спороходна	Од 200 до 100
Од 120 до 200	Франсисова средња	Од 100 до 50
Од 200 до 300	Франсисова брзоходна	Од 50 до 25
Од 300 до 400	Франсисова врло брзоходна	Од 25 до 15

3.8.1.3 Капланова турбина

Капланова турбина се користи на водотоковима са малим падом и великим протоком. Овај тип турбине може да се користи и код хидроелектрана малих снага са падом од једног метра. Положај турбине може бити хоризонталан, вертикалан и у S-изведби.

Имају добар степен искоришћења и при малим оптерећењима. Лопатице радног кола се углавном изводе као заокретне, а лопатице преткола као фиксне или као регулационе, [22].

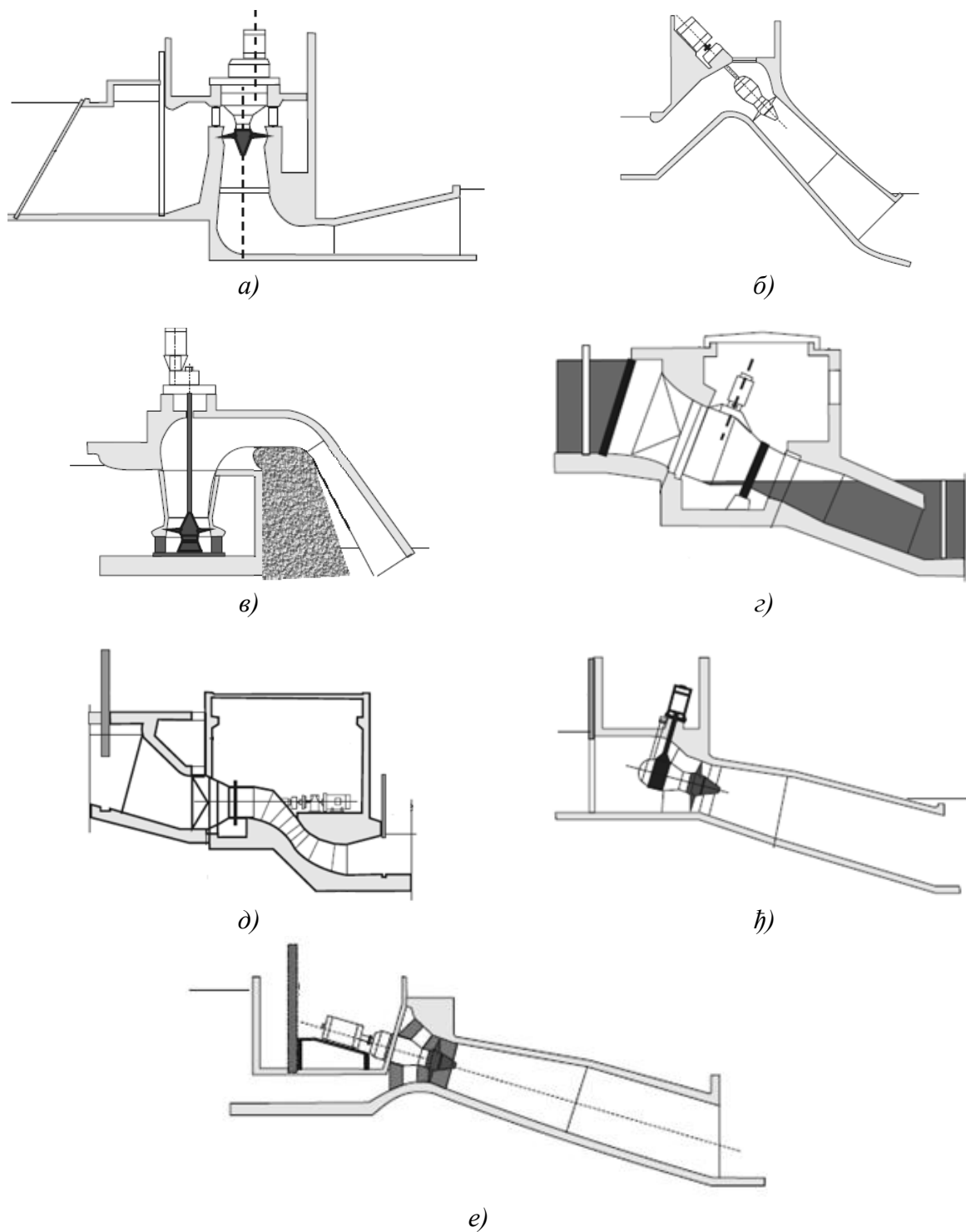


Слика 20 - Капланова турбина, [26]

У табели 3 је приказана подела Капланове турбине на основу специфичне брзине обртања и дата је типична примена у зависности од расположивог пада.

Табела 3 - Карактеристике Капланове турбине за различите падове, [22]

$n_s [min^{-1}]$	Врста турбине	Користан пад $H [m]$
Од 320 до 500	Капланова спороходна	Од 80 до 20
Од 500 до 700	Капланова средња	Од 20 до 14
Од 700 до 850	Капланова брзоходна	Од 14 до 10



Слика 21 - Различита конструкциона извођења Каплан турбине, [27]

3.8.1.4 Турго турбина

Турго турбина је модификована Пелтонова турбина. Радно коло изгледа као Пелтоново пресечено на пола и може имати једну или више млазница. Специфични број обртаја се смањује са повећањем броја млазница, [22].



Слика 22 - Радно коло Турго турбине, [28]

Због своје конструкције, Турго турбине се могу користити за веће протоке него Пелтон турбине. Подручје примене се налази у зони преклапања Пелтон и Франсис турбине. У неким случајевима због својих димензија и брзине могу се директно спојити са генератором, без употребе скупих преносника. С друге стране, Турго турбине је теже направити и лопатице су доста осетљивије него код Пелтон турбине, [22].

3.8.1.5 Банки турбина

Банки турбине се највише користе у хидроелектранама малих снага до 2 MW, на водотоковима са падом већим од 200 m, [22].

Састоје се од радног кола са хоризонталном осовином унутар кућишта. Лопатице радног кола су фиксно постављене по ободу и њихов број се креће до 37. Ивице лопатица су оштре како би се смањио отпор воде. Једноставна конструкција турбине омогућава да се она направи у радионици, при чему се лопатице радног кола праве од сегмента добијених аксијалним сечењем челичних цеви одговарајућег пречника.



Слика 23 - Радно коло Банки турбине, [29]

Основне предности ове турбине су: једноставна конструкција, ниска цена, добра регулациона својства. Недостаци Банки турбине, који посебно долазе до изражаја код турбина ручне израде су: нижи степен искоришћења од других турбина на истом водотоку, мора се поставити изнад нивоа доње воде, па је тај део пада неповратно изгубљен, брзина обртања је мања од синхроне, што захтева употребу скувих преносних уређаја (мултипликатора), [22].

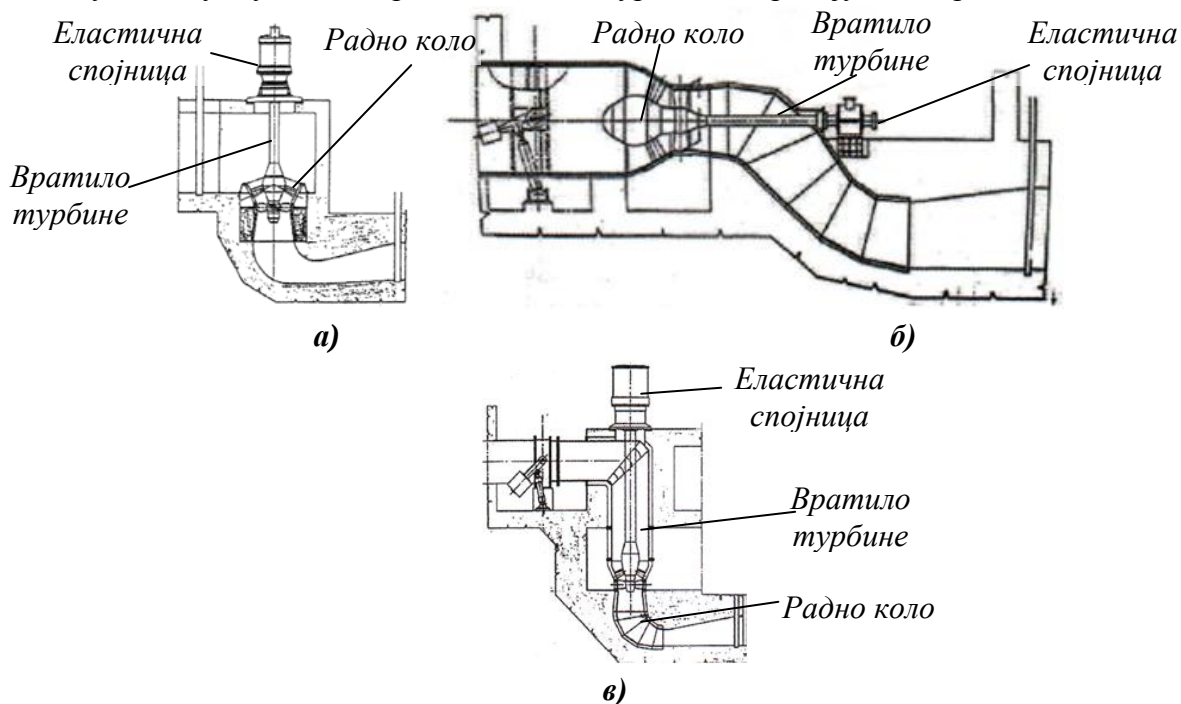
Банки турбине се, у циљу повећања ефикасности, често праве са два радна кола истих пречника али различитих дужина, смештених на заједничком вратилу. Мање радно коло се користи при малим протоцима (тада регулациона лопатица спречава доток воде ка другом радном колу). При средњим протоцима се користи веће радно коло, а при великим протоцима се користе оба, [22].

3.8.1.6 Мала цевна турбина

Цевне турбине се користе за екстремно ниске падове, чак и до 1m. Једноставне су конструкције, ротор им је пропелерног типа, енергетске и кавитационе карактеристике су слабије од других турбина, али грађевински радови су сведени на минимум. Предности цевне турбине у односу на Капланову са вертикалним вратилом су: већа пропусност, мање димензије хидроелектране, нижи инвестициони трошкови и већи степен искоришћења, [22].

Често се користе у цевоводима за водоснабдевање градова.

Неки произвођачи цевних турбина мале снаге настојали су да постигну њихову типизацију, да би се са што мањим бројем типова турбина покрила што већа област примене. Као главни параметар за избор основног типа турбине узет је пад H . У том смислу, целокупну област примене цевних турбина покривају само три типа, [22].



Слика 24 - Пресек цевних турбина за различите падове, [22]

а) $H=2-10\text{ m}$; б) $H=8-20\text{ m}$; в) $H=15-30\text{ m}$

3.8.1.7 Регулација турбина у хидроелектранама малих снага

Радне карактеристике водне турбине првенствено су одређене њеном геометријом и кинематиком (зависе од величине и облика турбине и од брзине обртања радног кола). Ако је геометрија константна, односно ниједан од елемената турбине не мења свој облик или положај, турбина је нерегулисана. У противном турбине су регулисане и имају своје хидрауличке и енергетске карактеристике прилагодљиве широком дијапазону услова рада. Регулација је неопходна за веће водне турбине, како због сигурности у погону, тако и због оптималног искоришћења хидрауличке енергије воде.

Под системом турбинске регулације подразумева се скуп елемената, уређаја и машина који обезбеђују регулацију броја обртаја и снаге агрегата, [22]. Овај систем чине: турбина, турбински регулатор и извршни регулациони орган. Систем за контролу брзине заснован је на механичким регулаторима осетљивим на промену брзине и хидрауличким затварачима за управљање дотоком воде у турбину. Турбински регулатор обезбеђује следеће функције: аутоматско покретање турбине из стања мировања и регулацију броја обртаја у празном ходу, регулацију броја обртаја (фреквенције) у самосталном раду агрегата, аутоматско одржавање жељеног нивоа воде или снаге при паралелном раду агрегата са мрежом, и аутоматско заустављање агрегата.

Према принципу рада турбински регулатори могу бити линеарни и импулсни.

Линеарни регулатори се израђују као: механички, механичко-хидраулични, електро-хидраулични и електрично-електрични, и претежно се користе за турбине средњих и већих снага.

Импулсни регулатори имају излазне сигнале импулсног карактера и углавном се користе за регулацију малих турбина.

3.8.2 Мултипликатор

Када турбина и генератор раде са истим бројем обртаја, директна веза је најбоље решење, јер нема губитка снаге односно енергије, а трошкови одржавања су минимални. Директна веза може да буде крута или чешће, флексибилна (еластичне спојнице). Међутим, у највећем броју случајева, а нарочито када су у питању хидроелектране малих снага, турбине раде на мање од 400 min^{-1} , стандардни генератори раде на 750 до 1000 min^{-1} . Ова разлика се превазилази постављањем мултипликатора, који је за мале хидроелектране економски знатно повољније решење од израде генератора по мери, [22].

Према конструкцији, мултипликатори који се користе код хидроелектрана малих снага, могу да буду: са хеликоидним зупчаницима који су постављени на паралелним вратилима, пужни или са каишним преносом. Највећу примену налази мултипликатор са каишним преносом јер је најјефтиније техничко решење.

Конструкција мултипликатора се изводи према међународним стандардима који имају веома конзервативан приступ и који се не воде трошковима. Када се разматра сама конструкција мултипликатора потребно је истаћи да је неопходно да

мултипликатор буде чврсте конструкције да би задржао међусобни положај свих елемената који трпе велики обртни момент турбине. Да би се постигла одговарајућа поузданост мултипликатора најважније је имати квалитетан и поуздан систем за подмазивање. Веома је важно да квалитет, количина (запремина), температура и вискозност средства за подмазивање не излазе ван специфицираних вредности. За преко 70% неисправности у раду мултипликатора одговоран је недостатак или лош квалитет средства за подмазивање, запушени филтери или продирање воде у систем за подмазивање. Још један важан елемент конструкције мултипликатора су и лежаји. За мале хидроелектране од 1 MW користе се котрљајни лежаји (па и до 5 MW). За веће хидро електране друга могућност су клизни лежаји којима се доводи уље под притиском, [22].



Слика 25 - Вертикални хеликоидни мултипликатор за Каплан турбину, [30]

3.8.3 Генератор

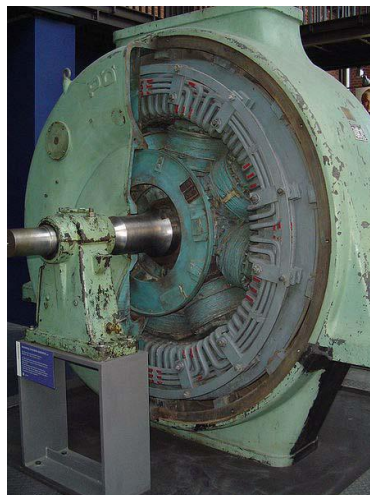
Обртањем вратила турбине у статору генератора се индукује електромоторна сила. Генератори могу бити синхрони и асинхрони.

Синхроне машине (слика 26.) представљају машине наизменичне струје, код којих трансформација енергије настаје услед механичког премештања сталног магнетног флукса полова у односу на непокретан намотај индукта. Синхроне машине могу да раде у генераторском и моторском режиму и углавном се користе као генератори у електранама, пошто се као мотори данас користе јефтинији и простији асинхрони мотори. У свакој електрани (хидро, термо и нуклеарној) налази се по неколико синхроних генератора великих снага спојених на исте сабирнице, [22].

Да би генератор радио, мора да постоји погонски мотор са регулатором брзине, чији је задатак да одржава синхрону брзину обртања ротора генератора.

У синхроном генератору за разлику од асинхроног, побудни флукс при празном ходу машине ствара намотај једносмерне струје, који је смештен на ротору.

Систем за побуђивање (намотај једносмерне струје или стални магнет) повезан је са регулатором напона који контролише излазни напон пре прикључивања генератора на мрежу.



Слика 26 - Синхрони генератор, [22]

Захваљујући способности да генерише реактивну снагу асинхрони генератор има могућност рада ван мреже, аутономно, и у том случају напаја неки засебан пријемник електричне енергије, или је паралелно прикључен на мрежу, на коју су прикључени и други синхрони генератори. Када ради паралелно са мрежом, синхрони генератор може да шаље или да узима електричну енергију из мреже, тј. да ради или као генератор или као мотор. Ефикасност рада синхроних генератора је већа од асинхроних (преко 0,97).

Код асинхроних машина (слика 27), брзина обртања ротора и брзина обртања обртног магнетног поља нису синхронизоване, па отуда и име.

Асинхрона машина не може да производи реактивну енергију, она мора да је узима из мреже, па је због тога и у моторском и у генераторском режиму потрошач реактивне енергије, што је један од основних разлога зашто се претежно користи као мотор. Такође, струјом потребном за побуђивање се напаја из електро-дистрибутивне мреже.



Слика 27 - Асинхрони генератори [22]

Асинхрони генератор може да се користи у оквиру аутономних електроенергетских система, а реактивна енергија се тада обезбеђује из кондензаторске батерије.

Главна предност асинхроних генератора у односу на синхроне, су нижи трошкови израде па је то уједно и главни разлог зашто се користе у хидроелектранама малих снага.

4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ МАЛЕ СНАГЕ

4.1 Избор локације

Могуће локације за изградњу хидроелектрана малих снага могу бити одређене произвољно или на основу "Катастра малих хидроелектрана Србије", који су за Електропривреду Србије израдила предузећа "Енергопројект" и Институт за водопривреду "Јарослав Черни" из Београда, 1987. године, [31].

Катастром је одређено 856 потенцијалних локација за које су дати хидролошки подаци, подаци о могућој акумулацији, геолошки подаци и мапе локација.

У Катастру нису узета у обзир ограничења у погледу управљања режимом вода, водоснабдевања, каналисања и санитарне заштите воде, заштите природних и културно историјских вредности. Због наведених ограничења и промене хидрологије речних токова у протеклих 30 година, у Просторном плану Републике Србије утврђено је да катастар малих хидроелектрана представља документациону подлогу, а да се хидроелектране граде на основу техничке документације, која је израђена правилима градње просторних планова подручја посебне намене и јединица локалне самоуправе и у складу са водним условима и условима заштите природе.

За потребе израде мастер рада изабрана је хидроелектрана малих снага "Рибаре" која је наведена у документу "Катастар малих хидроелектрана на територији СР Србије, ван АП" и који се налази на званичном сајту Министарства за рударство и енергетику. Хидроелектрана "Рибаре" је у катастру заведена под редним бројем 76, [31].

Локација за изградњу ове хидроелектране "Рибаре" налази се на реци Млави, узводно од места Рибаре, низводно од моста у насељу Изварица (место означено стрелицом на доле на приказаној мапи), [32].

Хидроелектрана се може прикључити на дистрибутивну мрежу у насељу Рибаре јер је електрична енергија енергент који не може да се складишти, већ мора да се одмах експлоатише, [32].



Слика 28 - Положај локације за изградњу хидроелектране "Рибаре", [33]

Најважнију подлогу за правилну израду пројекта представља хидролошка анализа водотока, [31]. Наиме, на бази ове подлоге се врши димензионисање електромашинске опреме и система хидрограђевинских објеката. Са друге стране, резултати ове анализе представљају улазне податке за прорачун производње електричне енергије, а самим тим и за калкулацију новчаних токова у току експлоатације хидроелектране.

Постоји више решења за остваривање хидролошке анализе. Прво решење подразумева мерење протока на месту предвиђеном за изградњу водозахвата мале хидроелектране. Ово подразумева изградњу мерне станице на локалитету и континуално мерење у трајању од најмање једне хидролошке године.

Предности овог решења је што се на овај начин добијају најсигурнији подаци о водотоку и кретањима протока у току године. Недостатак овог решења је у томе што је у питању скуп и дуготрајан поступак.

Друго решење је процена хидролошког стања на водотоку на бази мерења која се врше на мерној станици Хидрометеролошког завода Србије која се налази у Жагубици и кишомерним станицама које се налазе у широј околини предвиђеног локалитета. На основу ових података као и података о типу и квалитету земљишта на сливу реке Млаве, те о густини и типу растиња на сливу може се урадити хидролошка процена о стању водотока Млаве у делу предвиђеном за изградњу водозахвата мале хидроелектране. Имајући у виду да се овде ради о процењеним вредностима протока неопходно је извршити индикацијска мерења протока у неколико карактеристичних периода у току године, како би се утврдила евентуална велика одступања од процењених вредности.

Предности овог решења су у томе што овакав приступ даје бржу и јефтинију процену хидролошког стања на водотоку. Основни недостатак овог решења је у томе што се ипак ради о процени протока, па је самим тим повећан ризик да ће процењени подаци много одступати од стварних.

Хидролошки подаци који су добијени мерењем на усвојеној локацији имају следеће вредности, [32]:

- ❖ Површина слива: $F_{sl} = 408,8 \text{ km}^2$,
- ❖ Просечне падавине: $P_{sr} = 800 \text{ mm}$,
- ❖ Просечни проток: $Q_{sr} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$,
- ❖ Годишњи доток: $W_{god} = 135,21 \text{ hm}^3$,
- ❖ Специфични отицај: $10,5 \text{ l/sec/km}^2$,
- ❖ Евакуациона в.в.: $Q_{ev} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$.

Вредност биолошког минимума усвојен је на бази препорука, и он износи, [34]:

$$Q_{ec} \approx 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

а према катастру, максималан инсталирани проток износи, [32]:

$$Q_i = 6,44 \text{ m}^3/\text{s}$$

Дакле, кроз хидроелектрану "Рибаре" проток ће бити од $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ до $6,44 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2 Брана на Млави

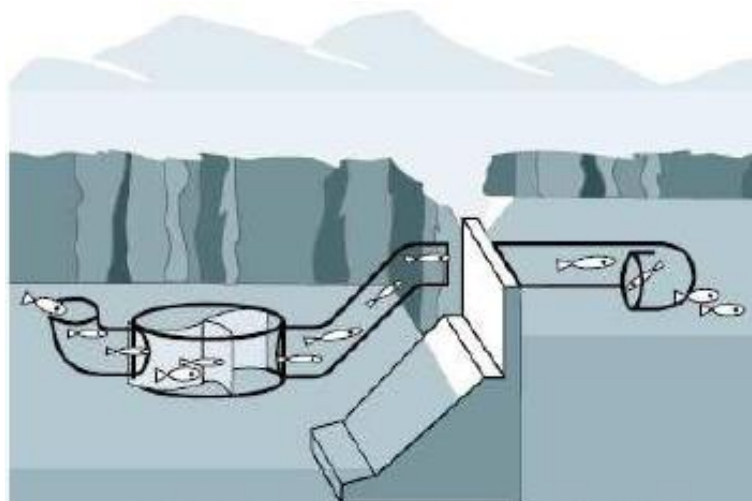
Преградно место се налази на око 1,1 km низводно од моста у насељу Изварица. Предложена акумулација у катастру се састоји од преливне бетонске бране висине око 3,5 m са захватом који садржи таложницу на десној обали одакле почиње укопан армирано-бетонски одвод до машинске зграде. Водоток је на месту предвиђеном за подизање бране широк око 16 m, а дубине је до 1,5 m. Речни нанос је дебљине 1,5 m. Састав речног наноса је: средњозрни песак, облаци шљунка величине до 20 cm. У кориту реке има и блокова стене величине до 1 m, [32].

На преградном месту су светло сиви банковити кречњаци, доње кредне старости на оба бока. Нагиб падине левог бока је око 45-50°. Падинска дробина је дебљине око 1-2 m. На десном боку је сеоски пут ширине 2 m и око 4 m изнад реке, а направљен је на речној тераси ширине око 10,0 m и дебљине око 1,5 m. Речну терасу чини заглињена песковито-шљунковита дробина. Нагиб падине изнад пута је око 55°. Дебљина падинске дробине је до 1 m, [32].

Бетон који се користи за израду бране мора да обезбеди довољну чврстоћу на притисак и да има ниску топлоту хидратације. Препоручује се коришћење споровезујућег цемента. Није дозвољена употреба различитих врста цемента, нити употреба исте врсте цемента различитих произвођача.

Акумулација која настаје подизањем нивоа воде не потапа насељени терен и обрадиво земљиште. С обзиром на морфологију слива, карактер тока реке, турбуленцију поплавног таласа, потребно је стабилизovati и заштити обалу од ерозије. Стабилизација речног корита и заштита од ерозије може се радити обалоутврдама или габионима, [22].

Како би се заштитила популација риба, неопходно је изградити заобилазне канале који ће омогућити рибама да заобиђу подручје хидроелектране, [35]. То се може извести са системом приказаном на слици 29. Да би заштита била потпуна, пожељно је код турбине инсталирати сонаре који такође усмеравају рибе у заобилазне канале.

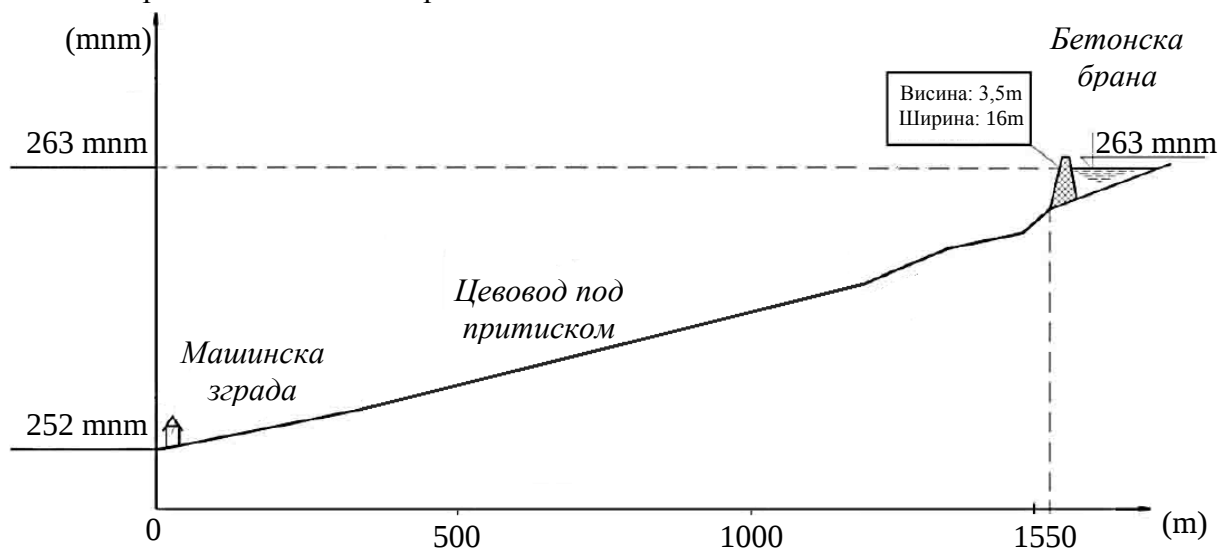


Слика 29 - Рибља стаза, [35]

НАПОМЕНА: Технички подаци који су предложени у оквиру овог мастер рада углавном су базирани на решењу које је предложено у катастру малих хидроелектрана, на територији Србије, [31].

4.3 Цевовод

Из хидрауличне шеме виде се коте које дефинишу комплетну трасу цевовода од бетонске бране до машинске зграде.



Слика 30 - Водоток реке Млаве: Подужни профил са предложеним решењима

Кота горње воде (H_g) у брани је 263,0 m, а кота доње воде (H_d) у машинској згради је 252,0 m. Према томе бруто пад се добија из израза, [34]:

$$H_b = H_g - H_d = 263,0 - 252,0 = 11 \text{ m} \quad (1)$$

Да би одредили нето пад, потребно је да се бруто пад умањи за суму свих губитака, укључујући губитке услед трења у цевоводу под притиском, који су приближно пропорционални квадрату брзине воде у цеви. Да остваре одређени проток, цевоводи под притиском мањег пречника, мораће да остваре већу брзину воде од цевовода са већим пречником и због тога ће и губици бити већи. Избор што мањег пречника ће умањити трошкове цевовода под притиском, али ће повећати губитке енергије и обрнуто. Једноставан критеријум за избор пречника је да ограничи губитке енергије до одређеног процента. Губитак енергије од 4% је обично прихватљив, [22].

Губици пада притиска у цевима се могу поделити на успутне губитке и локалне губитке енергије при проласку кроз решетку на улазу у цев, у коленима, проширењима, сужењима и вентилима, [22].

Успутни губици услед трења рачунају се помоћу израза [22]:

$$\Delta h_{vu} = \lambda \cdot \frac{L}{D_u} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2)$$

где су:

λ - коефицијент отпора трења флуида у правој цеви,

L - дужина цевне деонице,

D_u - унутрашњи пречник цевовода,

v - брзина флуида у цеви,

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ - земљино убрзање.

који се применом Манингове једначине за проток [22]:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

где су:

n - Манингов коефицијент храпавости,
 A - површина проточног пресека,
 R_h - мера ефикасности проточног пресека,
 I - нагиб.

може трансформисати у:

$$\frac{H_b}{L} = 10,3 \cdot \frac{n^2 \cdot Q^2}{d^{5,333}} \quad (4)$$

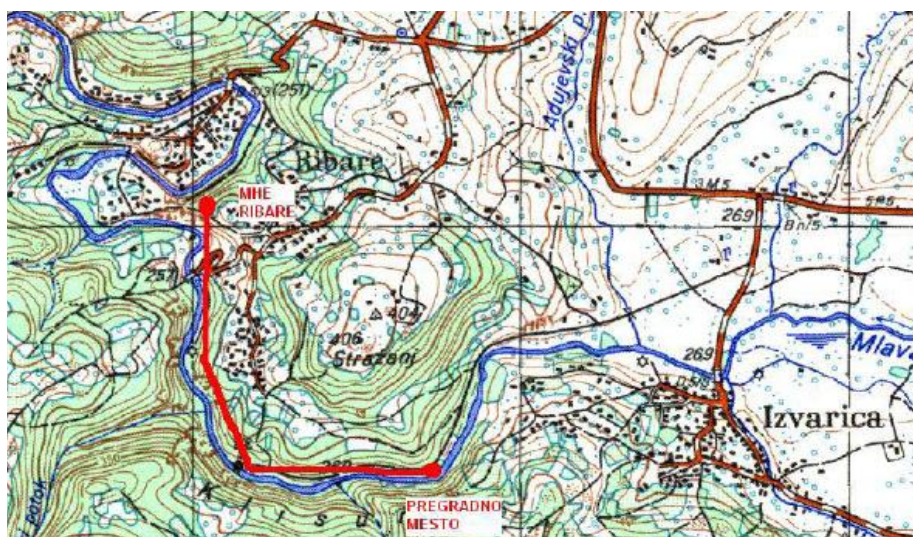
Анализом претходне једначине може се видети да двоструко смањење пречника, изазива повећање губитака 40 пута. Из једначине (4) следи да је:

$$D_u = \left(\frac{10,3 \cdot n^2 \cdot Q^2 \cdot L}{H_b} \right)^{0,1875} \quad (5)$$

Ако се ограничи H_b на $4H/100$, и ако су познати Q , n и L , пречник ценовода D_u се може израчунати једначином, [22]:

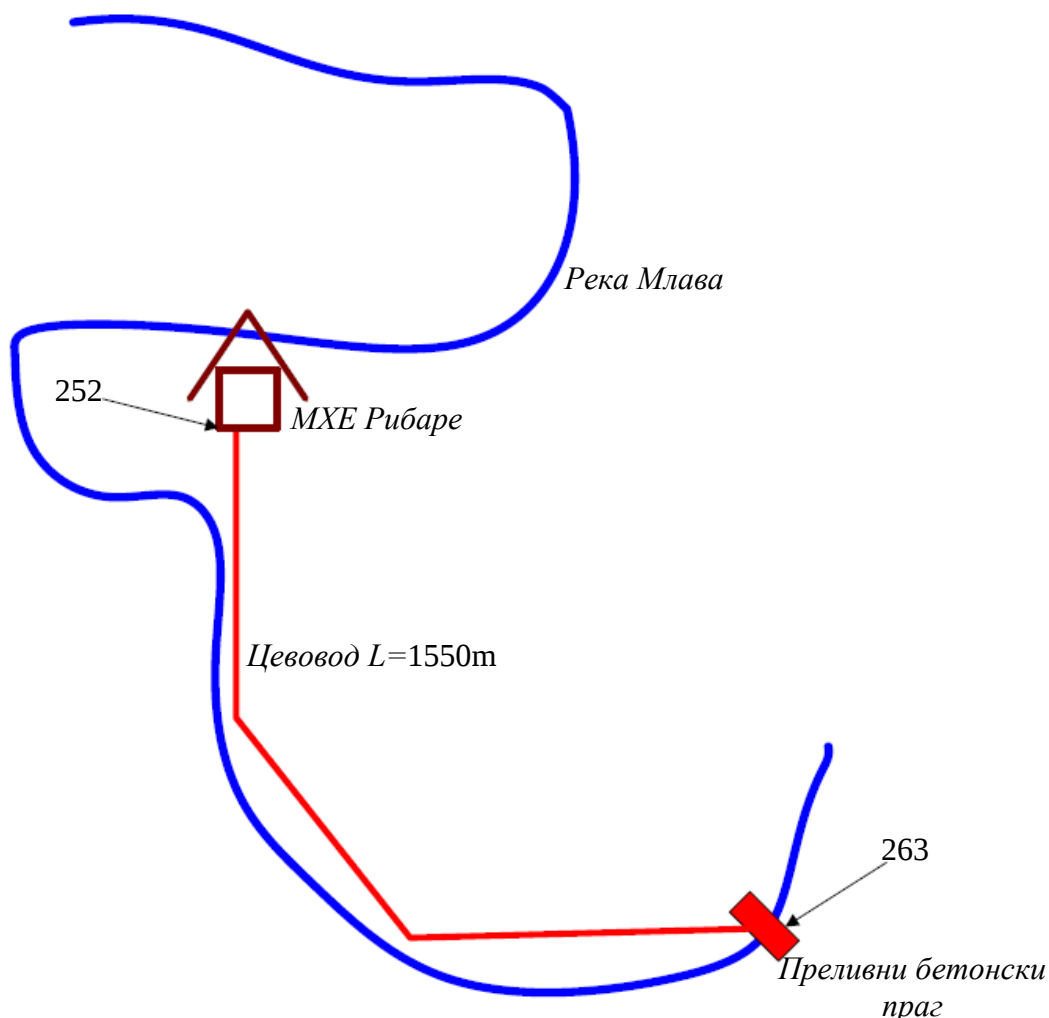
$$D_u = 2,69 \cdot \left(\frac{n^2 \cdot Q^2 \cdot L}{H_b} \right)^{0,1875} \quad (6)$$

Вода се од таложнице на десној обали реке спроводи гравитационим армирано-бетонским ценоводом дужине око 1550 m до водне коморе. Ценовод се у почетном делу трасе води речном трасом, а одатле прелази на падину изнад речне трасе. Од водене коморе до машинске зграде лоциране у насељу, водоток се спроводи кроз челичну цев, дужине 30 m.



Слика 31 - Топографска мапа локалитета хидроелектране "Рибаре" са уртаним позицијама хидрограђевинских објеката, [33]

На бази топографије терена и техничких података може се усвојити шематски приказ хидроелектране "Рибаре" као на слици 32.



Слика 32 - Шематски приказ хидроелектране "Рибаре", [33]

За $Q = 6,44 \text{ m}^3/\text{s}$, дужину цевовода $L = 1550 \text{ m}$, бруто пад $H_b = 11 \text{ m}$ и Манингов коефицијент за бетонске цеви са челичним језгром $n = 0,012$, [22], потребан пречник цевовода износи:

$$D_u = 2,69 \cdot \left(\frac{0,009^2 \cdot 6,44^2 \cdot 1550}{11} \right)^{0,1875} = 2,338 \text{ m} \quad (7)$$

Из каталога, [36] се усваја стандаран унутрашњи пречник цевовода $\varnothing 2400 \text{ mm}$ који се формира из сегмената ефективне дужине $1,5 \text{ m}$. Дебљина зида цеви 250 mm . Предност примене бетонских цевовода је што на њих не утиче корозија, док је главни недостатак велика сопствена тежина која за изабрани цевовод износи $5,2 \text{ t}$ по сегменту. Уградња цеви ће се вршити према препорукама произвођача уз осигурање од хоризонталних ломова на свим теренима.

За прецизније одређивање нето пада морају се посебно израчунати сви губици у цевоводу. Коефицијент линијских губитака рачуна се по Манингу, па је, [22]:

$$\lambda = 124,6 \cdot \frac{n^2}{D_u} = 124,6 \cdot \frac{0,014^2}{2,4} = 0,010176 \quad (8)$$

Губитак притиска због линијских и локалних губитака при транспорту дефинисане количине воде кроз цевовод добија се на основу израза, [22]:

$$\Delta h = \left(\xi_{ul} + \sum \xi_{hkr} + \sum \xi_{vkr} + \frac{\lambda \cdot L}{D_u} \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

где су: $\xi_{ul} = 0,5$ - коефицијент локалног губитка на улазу у цевовод, [22];

$\xi_{hkr} = 0,144933$ - губитак за хоризонталне углове скретања цевовода, [22];

$\xi_{vkr} = 0,004045$ - губитак за вертикалне углове скретања цевовода, [22];

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{D_u^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 6,44}{2,4^2 \cdot \pi} = 1,423 \text{ m/s}^2 \quad \text{- брзина флуида у цевоводу}$$

Заменом вредности у једначину (9) добија се вредност губитка притиска:

$$\Delta h = \left(0,5 + 0,144933 + 0,004045 + \frac{0,010176 \cdot 1550}{2,4} \right) \cdot \frac{1,423^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$\Delta h = 0,745258 \text{ m}$$

Нето пад износи:

$$H_n = H_b - \Delta h = 11 - 0,745258 = 10,255 \text{ m} \quad (10)$$

Из овог се може закључити да је нето пад променљива величина која зависи од протока односно од брзине струјања флуида.

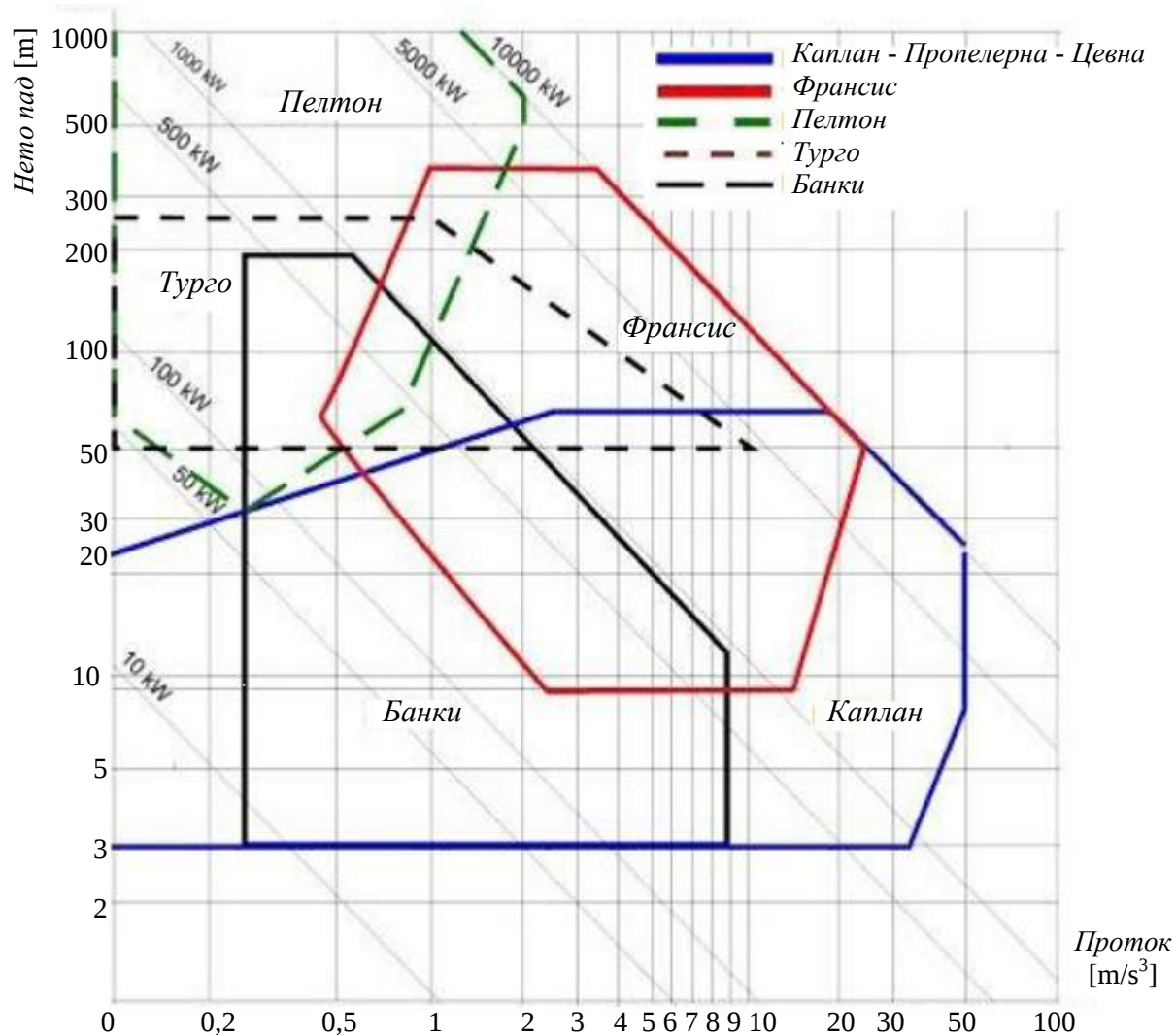
4.4 Избор турбине

Избор турбине зависи од расположивог нето пада и протока, цене постројења, броја обраћа генератора, захтева одржавања, могућности појаве кавитације, осетљивости турбине на механичке нечистоће у струји воде и од осталих критеријума.

Хидро турбину треба одабрати тако да одговара специфичним условима који се јављају на локацији, а са циљем да се оствари очекивана висока ефикасност. На различитим локацијама се појављују различити падови као и расположиви протоци, а број комбинација протока и падова је практично једнак броју локација, па се само случајно једна иста турбина може ефикасно употребити на више локација.

На основу познатог максималног протока $6,44 \text{ m}^3/\text{s}$ и нето пада $10,255 \text{ m}$ најповољније је усвојити Капланову вертикалну спиралну турбину што се може видети и са дијаграма приказаном на слици 33, [22]. Треба напоменути да подаци дати у

дијаграму зависе од произвођача до произвођача и да их треба схватити као оквирне препоруке.



Слика 33 - Позиционирање појединих типова турбина унутар расположивих протока и падова на локацији, [22]

Турбина ће бити од руског произвођача "Ленинградский Металлический завод" - ЛМЗ који је од 2000. године део компаније "Силовые машины" која је међу првих 10 лидера у производњи опреме за термо, хидро и нуклеарне електране, [37].

Ознака турбине је ПЛ10 и предвиђена је за пад од 3 до 10 m, а садржи 4 лопатице, [37].

Снага на вратилу радног кола турбине (P_T) се израчунава изразом, [38]:

$$P_T = \eta_T \cdot 9,81 \cdot Q \cdot H_n \quad (11)$$

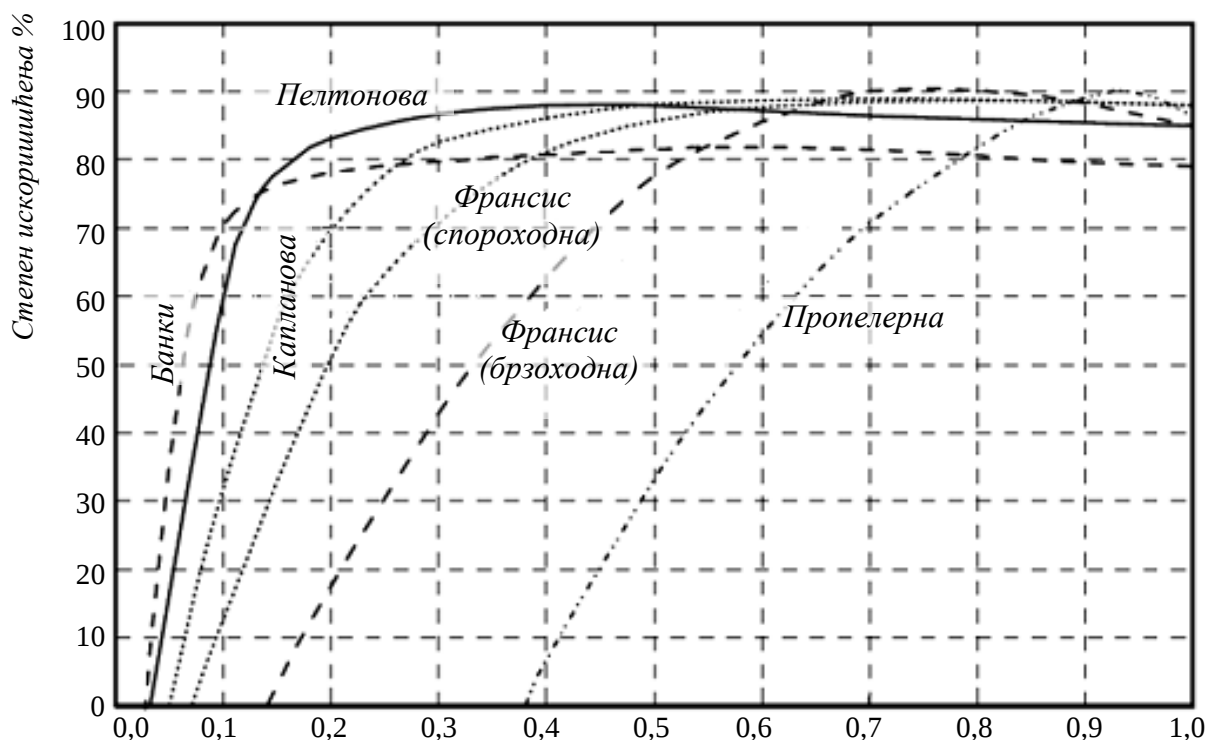
где су:

Q (m^3/s) - проток кроз турбину,

H (m) - нето пад,

η_T - степен искоришћења турбине.

Степен искоришћења турбине је директно дефинисан губицима у турбинском колу, који се могу поделити на: хидрауличке, запреминске и механичке, [22].



Слика 34 - Степен искоришћења различитих типова турбина, [22]

Хидраулички губици састоје се од: ударних губитака на улазу у спроводно коло и ротор турбине, губитака због трења у проточном систему и од губитака на улазу из усисне цеви.

Запремински губици састоје се од: губитака у лавиринтима и од губитака у зазору између лопатица и спољашњег зида лопатица и главчине радног кола.

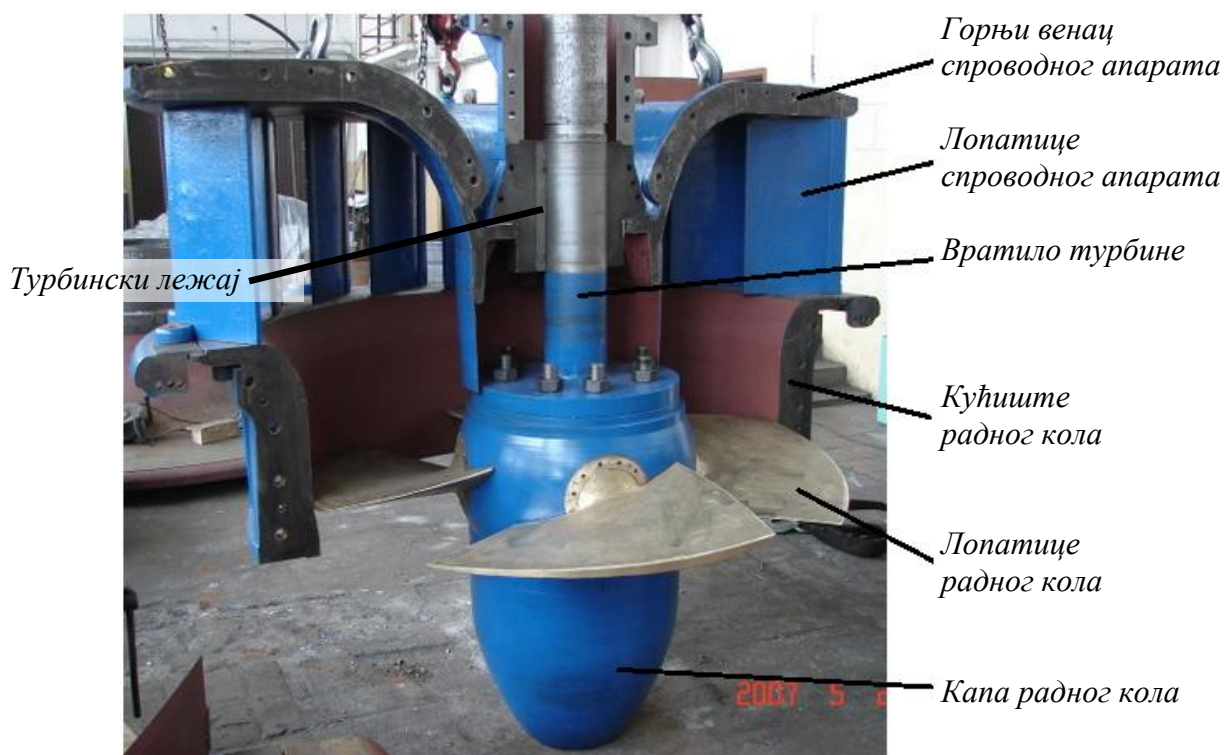
Механички губици обухватају губитке у лежајевима и у преносним помоћним механизмима.

Степен искоришћења турбине зависи од радног режима турбине, односно од протока, [39]. Турбине су пројектоване да имају максимални степен искоришћења при инсталисаном протоку. Свако одступање протока од инсталисаног доводи до извесног пада ефикасности турбине. На слици 34., [22] су приказане карактеристике степена искоришћења различитих типова турбина за различите протоке.

Као што се може видети са слике 34., за однос средњег и максималног протока $4,29/6,44 = 0,666$ степен искоришћења турбине износи 88%.

Заменом вредности у израз (11), снага на вратилу радног кола турбине (P_T) при максималном протоку износи:

$$P_T = 0,88 \cdot 9,81 \cdot 6,44 \cdot 10,255 = 570,129 \text{ kW}$$



Слика 35 - Делови Каплан турбине, [40]

4.4.1 Радно коло

Минимална потребна вредност пречника радног кола се одређује из израза:

$$D_1 = \sqrt{\frac{P_T}{9,81 \cdot Q'_{lp} \cdot \eta_T \cdot H_n^{3/2}}}, \quad (12)$$

где је:

$Q'_{lp} = 1,25 \div 1,45 \text{ m}^3/\text{s}$ - наведени проток за одређени модел хидротурбине дефинисан на основу њених карактеристика, [38]. Усваја се: $Q'_{lp} = 1,35 \text{ m}^3/\text{s}$.

Заменом вредности у израз (12) добија се:

$$D_1 = \sqrt{\frac{570,129}{9,81 \cdot 1,35 \cdot 0,88 \cdot 10,255^{3/2}}} = 3,118 \text{ m}$$

Усваја се први већи стандаран пречник према, [38]:

$$D_1 = 3200 \text{ mm}$$

Специфични број обртаја турбине ПЛ10 износи: $n_d' = 165 \div 185 \text{ min}^{-1}$, [38]. Усваја се: $n_d' = 178 \text{ min}^{-1}$.

Број обртаја радног кола се сада може израчунати на основу израза, [38]:

$$n_T = \frac{n_d' \cdot \sqrt{H_n}}{D_1} \quad (13)$$

$$n_T = \frac{178 \cdot \sqrt{10,255}}{3,2} = 178,13 \text{ min}^{-1}$$

Остале димензије радног кола према ЛМЗ препоруци, [38] дате су у облику аналитичких израза и добијају се свођењем њихових величина на пречник радног кола D_1 :

$$d_{vt} \approx (0,3 \div 0,6) \cdot D_1 = 0,45 \cdot 3200 = 1440 \text{ mm} \quad (14)$$

$$k = 0,05 \cdot D_1 = 0,05 \cdot 3200 = 160 \text{ mm} \quad (15)$$

$$d_c = d_{vt} - k = 1440 - 160 = 1280 \text{ mm} \quad (16)$$

$$b_0 = b_{sa} = (0,45 \div 0,35) \cdot D_1 = 0,4 \cdot 1440 = 576 \text{ mm} \quad (17)$$

$$h_1 = 0,2085 \cdot D_1 = 0,2085 \cdot 3200 = 667,2 \text{ mm} \quad (18)$$

$$d = 0,1 \cdot D_1 = 0,1 \cdot 3200 = 320 \text{ mm} \quad (19)$$

$$\delta = 0,001 \cdot D_1 = 0,001 \cdot 3200 = 3,2 \text{ mm} \quad (20)$$

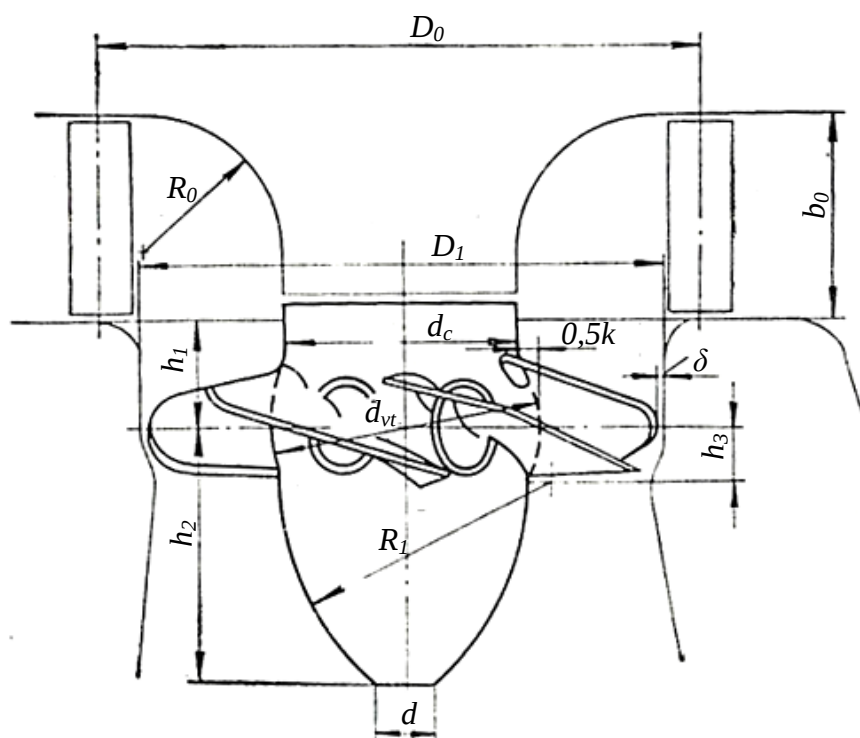
$$R_0 = 0,5 \cdot (D_1 - d_{vt} + k) = 0,5 \cdot (3200 - 1440 + 160) = 960 \text{ mm} \quad (21)$$

$$h_2 = 1,1 \cdot d_c = 1,1 \cdot 1280 = 1408 \text{ mm} \quad (22)$$

$$h_3 = 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot d_{vt} - k - k^2} = 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 1440 - 160 - 160^2} = 820,73 \text{ mm} \quad (23)$$

$$R_1 = \frac{0,25 \cdot (d_c - d)^2 + (h_2 - h_3)^2}{d_c - d} \quad (24)$$

$$R_1 = \frac{0,25 \cdot (1280 - 320)^2 + (1408 - 820,73)^2}{1280 - 320} = 599,27 \text{ mm}$$

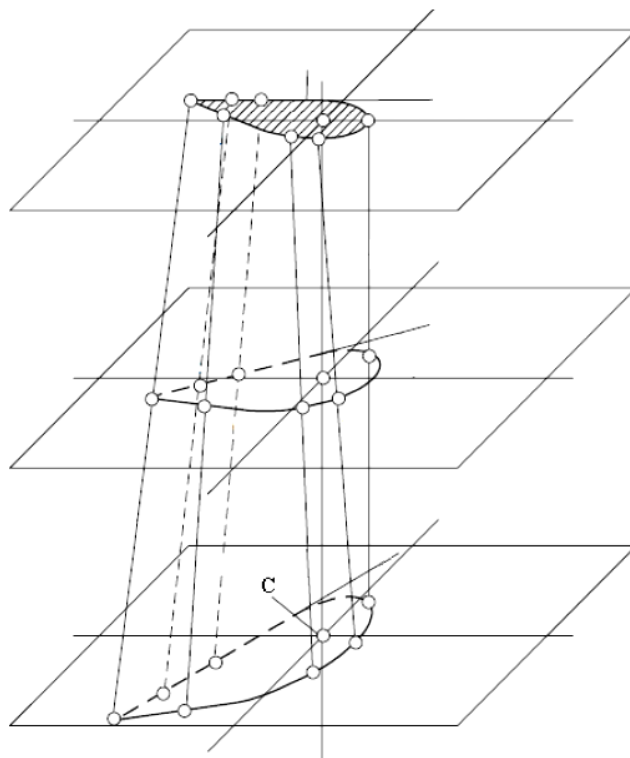


Слика 36 - Геометрија радног кола, [38]

4.4.2 Лопатице радног кола

Избор лопатице радног кола се врши тако да одговарају специфичним условима који се јављају на изабраним локацијама, са циљем да се оствари очекивана висока ефикасност.

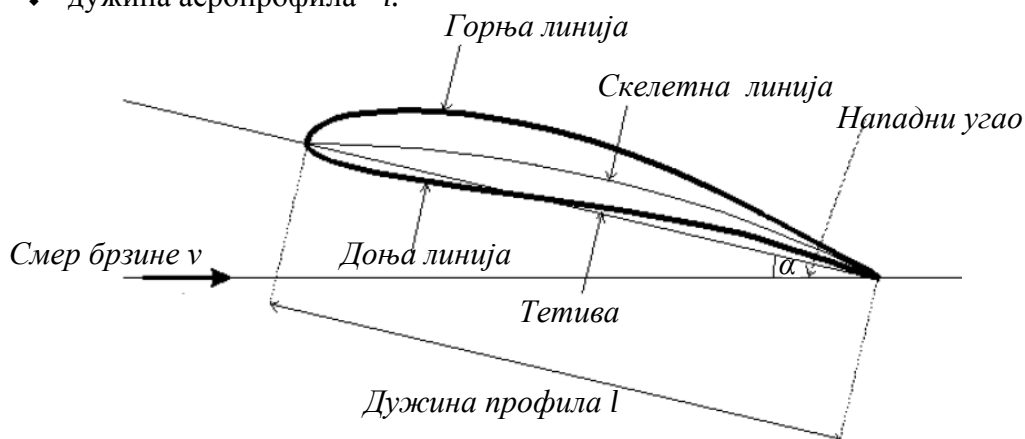
Сваки пресек лопатице радног кола претставља карактеристичан аеропрофил кога карактеришу одређени параметри или величине, што је приказано на слици 37.



Слика 37 - Карактеристични пресеци лопатице радног кола, [41]

За избор аеропрофила, потребно је знати неколико битних израза, [41]:

- ❖ скелетна линија - означава средњу линију аеропрофила, скуп свих тачака са једнаком удаљеношћу од горње и доње ивице профила,
- ❖ тетива - линија која спаја предњи и задњи крај аеропрофила. у односу на њу се рачуна нападни угао флуида,
- ❖ дужина аеропрофила - l .



Слика 38 - Називи делова аеропрофила, [41]

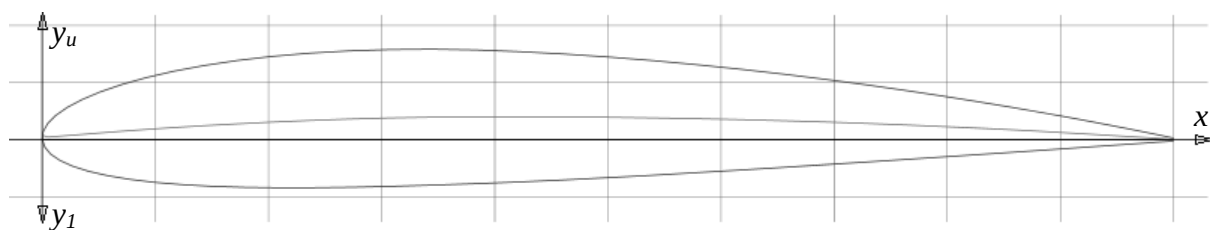
Од многих врста аеропрофила, најпознатија и најдефинисанија су *NACA* (*Национални Саветодавни комитет за аеронаутику*) аеропрофили. За лопатице Каплан турбине најчешће се користи "једноставан" *NACA* аеропрофил 2412, [43]. Овај аеропрофил је у потпуности дефинисан изразом *NACA mpxx*, где је, [44]:

- m - максимална висина скелетне линије,
- p - удаљеност тачке максималне висине скелетне линије од врха аеропрофила у десетинама процента. Дакле, $p=4$ означава да се максимална висина скелетне линије налази на 40% дужине аеропрофила, гледано од предњег према задњем делу,
- xx - означава максималну величину задебљања у процентима дужине аеропрофила.

На основу ових података се добијају две формуле које дефинишу скелетну линију аеропрофила и једна која дефинише задебљање. Од тих три формула се затим изводе коначне координате тачака са ивицама аеропрофила.

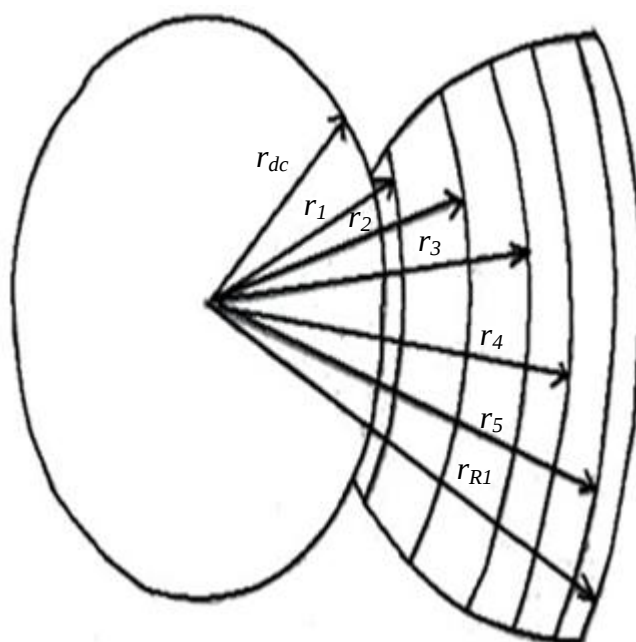
Табела 4 - Координате аеропрофила *NACA* 2412, [44]

x	y_u	y_l
0	0	0
1.25	2.15	-1.65
2.5	2.99	-2.27
5	4.13	-3.01
7.5	4.96	-3.46
10	5.63	-3.75
15	6.61	-4.10
20	7.26	-4.23
30	7.88	-4.12
40	7.80	-3.80
50	7.24	-3.34
60	6.36	-2.76
70	5.18	-2.14
80	3.75	-1.50
90	2.08	-0.82
100	0.13	-0.13



Слика 39 - Аеропрофил *NACA* 2412, [44]

У простору, лопатица радног кола се може поделити у 5 карактеристична пресека, што је приказано сликом 40, [44].



Слика 40 - Карактеристични пресеци лопатице радног кола, [44]

Пресек I,

$$r_1 = \frac{d_c}{2} + 0.015 d_c = \frac{1280}{2} + 0.015 \cdot 1280 = 659,2 \text{ mm} \quad (25)$$

Пресек III,

$$r_3 = \frac{D_1}{2} \sqrt{\frac{1 + (d_c / D_1)^2}{2}} = \frac{3200}{2} \sqrt{\frac{1 + (1280 / 3200)^2}{2}} = 1218,523 \text{ mm} \quad (26)$$

Пресек II,

$$r_2 = r_1 + \frac{r_3 - r_1}{2} = 659,2 + \frac{1218,523 - 659,2}{2} = 938,861 \text{ mm} \quad (27)$$

Пресек V,

$$r_5 = \frac{D_1}{2} - 0.015 D_1 = \frac{3200}{2} - 0.015 \cdot 3200 = 1552 \text{ mm} \quad (28)$$

Пресек IV,

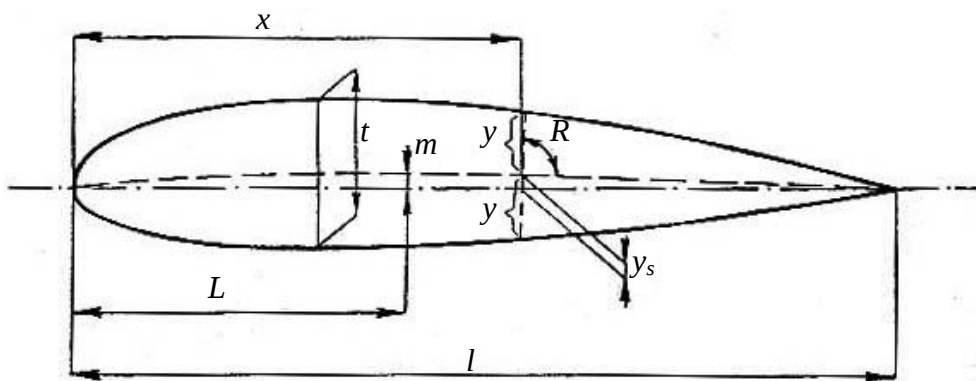
$$r_4 = r_3 + \frac{r_5 - r_3}{2} = 1218,523 + \frac{1552 - 1218,523}{2} = 1385,261 \quad (29)$$

Основне геометријске зависности код аеропрофила су, [44]:

$$\frac{m}{l} = 0.02 \quad (30)$$

$$\frac{L}{l} = 0.40 \quad (31)$$

$$\frac{t}{l} = 0.12 \quad (32)$$



Слика 41 - Главне димензије аеропрофила, [44]

Дужина лопатице дефинише се у односу на број лопатице и тражени преклоп. Претходно је усвојено 4 лопатице. Лопатице морају бити тако постављене у турбини да између њих нема шупљина, тј. делова тока који су непокривени лопатицама, јер би ти делови значили чист губитак. Пошто је усвојено 4 лопатице, потребно је да свака од њих покрива једну четвртину површине радног кола. Лопатице су, међутим, постављене под углом у односу на хоризонталу па се због тога дужина аеропрофила лопатице повећава за 20%, како би се покриле шупљине у току флуида настале услед заокретања лопатица. Коначан израз за дужине појединачних аеропрофила гласи, [45]:

$$l_i = \frac{D_i \cdot \pi}{z} \cdot 1,2 \quad (33)$$

Табела 5 - Дужине карактеристичних аеропрофила

D_i [mm]	1318.4	1877,722	2437,046	2770,522	3104
l_i [mm]	1241.933	1768.814	2295.697	2609.832	2923.968

Ширина аеропрофила одређује се из геометријске зависности, па је:

$$t_i = l_i \cdot 0.12 \quad (34)$$

Табела 6 - Ширине карактеристичних аеропрофила

l_i [mm]	1241.933	1768.814	2295.697	2609.832	2923.968
t_i [mm]	149.032	212.258	275.484	313.180	350.876

Највећа закривљеност аеропрофила m се такође одређује из геометријске зависности:

$$m_i = l_i \cdot 0.02 \quad (35)$$

Табела 7 - Највећа закривљеност карактеристичних аеропрофила

l_i [mm]	1241.933	1768.814	2295.697	2609.832	2923.968
m_i [mm]	24.839	35.376	45.914	52.197	58.479

И координате највеће закривљености L се одређују из геометријске зависности:

$$L_i = l_i \cdot 0.40 \quad (36)$$

Табела 8 - Највећа закривљеност карактеристичних аеропрофила

l_i [mm]	1241.933	1768.814	2295.697	2609.832	2923.968
L_i [mm]	496.773	707.526	918.279	1043.933	1169.587

Да би се одредиле коначне координате аеропрофила, потребно је прво израчунати једначину за сваку x координату аеропрофила и то поновити за остала четири аеропрофила, [43]:

$$y_c = \frac{m}{(1-L)^2} [(1-2L) + 2L \cdot x - x^2] \quad \text{од } x = p \text{ до } x = c \quad (37)$$

Затим израчунати дебљину за сваку x координату аеропрофила и то поновити за остала четири аеропрофила, [43]:

$$y_{ti} = \frac{t_i}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.126x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \quad (38)$$

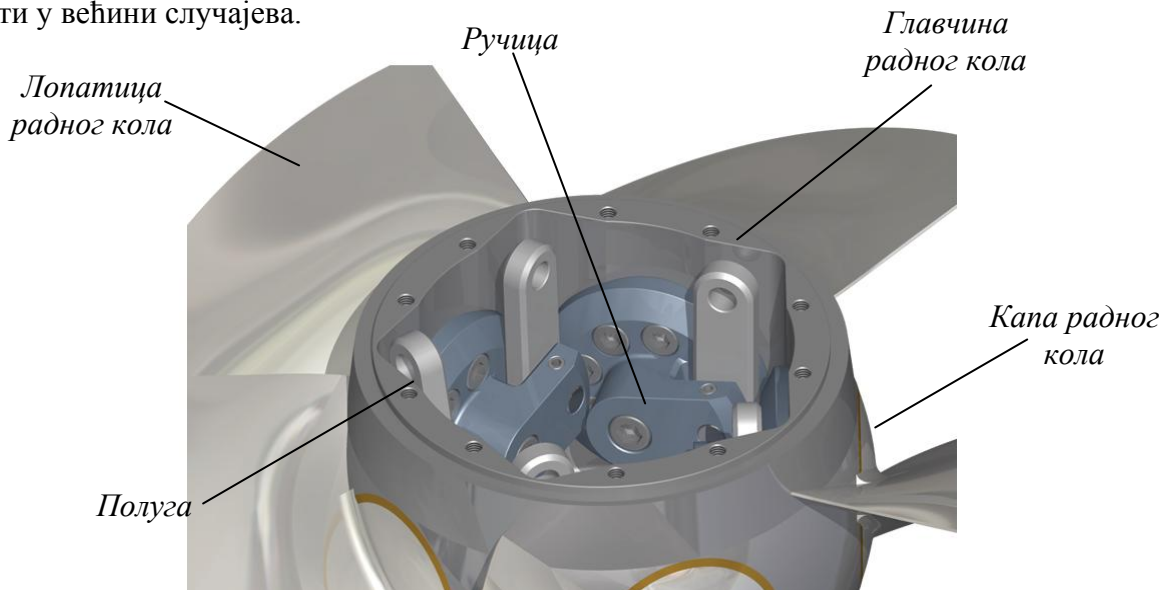
Финалне координате одређују се на основу једначина, [43]:

$$\tan \theta = \frac{dy_c}{dx} \quad (39)$$

$$y_u = y_c + y_t \times \cos \theta \quad (40)$$

$$y_l = y_c - y_t \times \cos \theta \quad (41)$$

Основна предност Каплан турбине је двострука регулација лопатица. Прве регулација лопатица се односи на лопатице спроводног апарату, а друге на лопатице радног кола. На слици 42 је приказан механизам за заокретање лопатица радног кола. Треба напоменути да је овај механизам индивидуално решење, али принцип рада је исти у већини случајева.

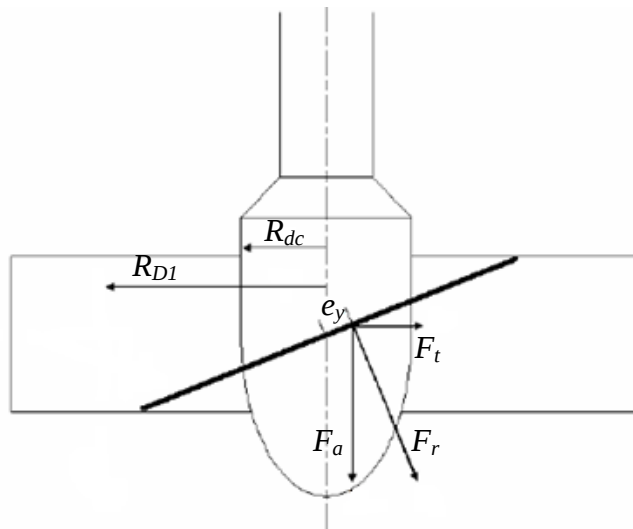


Слика 42 - Механизам за заокретање лопатица радног кола, [46]

У капи радног кола се осим лежаја обично поставља шупље вратило радног кола, полуге, ручице и регулациони прстен па се заокретање лопатица радног кола остварује заокретањем регулацијског прстена помоћу сервомотора које се системом полуга и ручица преноси на сваку лопатицу посебно. Серво мотор се снабдева са уљем под притиском из уљне главе, и врши заокретање лопатица чиме се остварује висок степен искоришћења.

4.4.3 Силе на лопатицама радног кола

У току рада турбине, на лопатицама радног кола се јавља аксијална, тангенцијална, радијална и центрифугална сила. Само одређивањем вредности ових сила, може се правилно димензионисати механизам за заокретање лопатица радног кола.



Слика 43 - Силе на радном колу, [47]

Тангенцијална сила је дефинисана изразом, [47]:

$$F_t = \frac{P_t}{2 \cdot \pi \cdot n_T \cdot z_L \cdot r_s} \quad [\text{N}] \quad (42)$$

где су:

P_t - снага турбине [W]

n_T - број обртаја турбине [s^{-1}]

z_L - број лопатица на турбини

$$r_s = \sqrt{\frac{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2}{2}} \quad \text{- полупречник до центра деловања притиска [m]}$$

За $r_s = 1,21852 \text{ m}$ тангенцијална сила износи:

$$F_t = \frac{570,129 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 2,9187 \cdot 4 \cdot 1,21852} = 6378,391 \text{ N}$$

Аксијална сила је дефинисана изразом, [47]:

$$F_a = g \cdot \rho \cdot H_n \cdot A_b \quad [\text{N}] \quad (43)$$

где су:

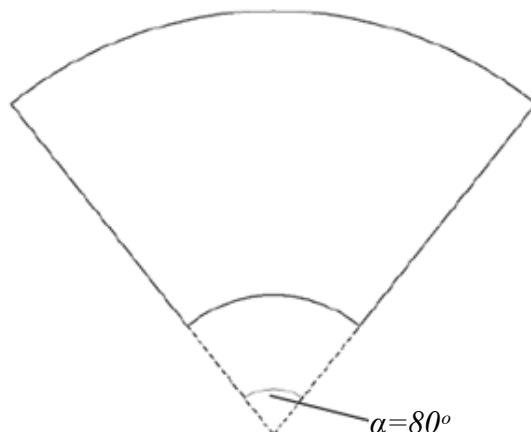
g - убрзање земљине теже [m/s^2]

ρ - густина воде [kg/m^3]

H_n - нето пад [m]

A_b - површина лопатице радног кола [m]

Да би се израчунала површина A_b , мора се усвојити претпоставка. Под претпоставком да је коефицијент узгона l/t константан, настаје поједностављена површина лопатице приказана на слици 44, [47].



Слика 44 - Поједностављена скица површине лопатице радног кола, [47]

Површина лопатице радног кола се одређује на основу израза, [47]:

$$A_b = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot \left(\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \right)}{360} \text{ [m}^2\text{]} \quad (44)$$

Након замене вредности, израчунава се површина A_b :

$$A_b = \frac{\pi \cdot 80 \cdot (1,6^2 - 0,64^2)}{360} = 1,501 \text{ m}^2$$

па аксијална сила износи:

$$F_a = 9,81 \cdot 1000 \cdot 10,255 \cdot 1,501 = 151002,921 \text{ N}$$

Резултујућа сила се може одредити из израза, [47]:

$$F_r = \sqrt{F_t^2 + F_a^2} \text{ [N]} \quad (45)$$

Заменом вредности, добија се:

$$F_r = \sqrt{F_t^2 + F_a^2} = \sqrt{6378,391^2 + 151002,921^2} = 151137,573 \text{ N}$$

Резултујућа сила F_r узрокује окретање радног кола "хидрауличким моментом". Вредност овог момента се мења због регулације лопатица радног кола. Међутим, главни момент који вратило мора да издржи је узрокован у тренутку који је описан следећом једначином, [47]:

$$M_h = F_r \cdot e_y \quad (46)$$

где је:

e_y - растојање центра деловања притиска од централне осе радног кола

Растојање e_y се може израчунати из израза, [47]:

$$e_y = \frac{I_s}{y_s \cdot A_b} \quad (47)$$

где су:

I_s - момент инерције [mm^4]

y_s - растојање између центра гравитације и x осе [mm]

A_b - површина лопатице [mm^2]

Момент инерције се одређује из израза, [47]:

$$I_s = \frac{\left(\frac{D_1}{2}\right)^4 - \left(\frac{d_c}{2}\right)^4}{4} \cdot \left(\frac{\alpha}{2} - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\frac{\alpha}{2}\right) \quad (48)$$

$$I_s = \frac{1600^4 - 640^4}{4} \cdot \left(\frac{1,396}{2} - \sin\left(\frac{80}{2}\right) \cdot \cos\frac{80}{2}\right) = 6,564507246 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

Растојање y_s се одређује из израза, [47]:

$$y_s = \frac{F_a}{g \cdot \rho \cdot A_b \cdot \cos \varepsilon} \quad (49)$$

где је:

ε - угао регулације лопатице. Када је угао регулације лопатице мањи, веће је растојање e_y . Усваја се најмањи могући угао регулације 20° , [47].

Заменом вредности добија се:

$$y_s = \frac{6378,391}{9,81 \cdot 1000 \cdot 1,501 \cdot \cos 20^\circ} = 0,460973 \text{ m}$$

Све потребне вредности су сада познате и може се израчунати e_y :

$$e_y = \frac{6,564507246 \cdot 10^{11}}{460,973 \cdot 1,501 \cdot 10^6} = 94,873 \text{ mm}$$

Вредност хидрауличног момента:

$$M_h = 151137,573 \cdot 94,873 = 14,338874 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

4.4.4 Кућиште радног кола

Облик кућишта радног кола такође се према ЛМЗ препоруци, [38] одређује на основу пречника радног кола D_1 :

$$R_{v1} = 0,05 \cdot D_1 = 0,05 \cdot 3200 = 160 \text{ mm} \quad (50)$$

$$R_{v2} = 0,1 \cdot D_1 = 0,1 \cdot 3200 = 320 \text{ mm} \quad (51)$$

$$R_{v3} = 0,5 \cdot D_1 = 0,5 \cdot 3200 = 1600 \text{ mm} \quad (52)$$

$$R_{v4} = 0,385 \cdot D_1 = 0,385 \cdot 3200 = 1232 \text{ mm} \quad (53)$$

$$h_{v0} = 0,2085 \cdot D_1 = 0,2085 \cdot 3200 = 667,2 \text{ mm} \quad (54)$$

$$h_{v1} = 0,154 \cdot D_1 = 0,154 \cdot 3200 = 492,8 \text{ mm} \quad (55)$$

$$h_{v2} = 0,0552 \cdot D_1 = 0,0552 \cdot 3200 = 1766,4 \text{ mm} \quad (56)$$

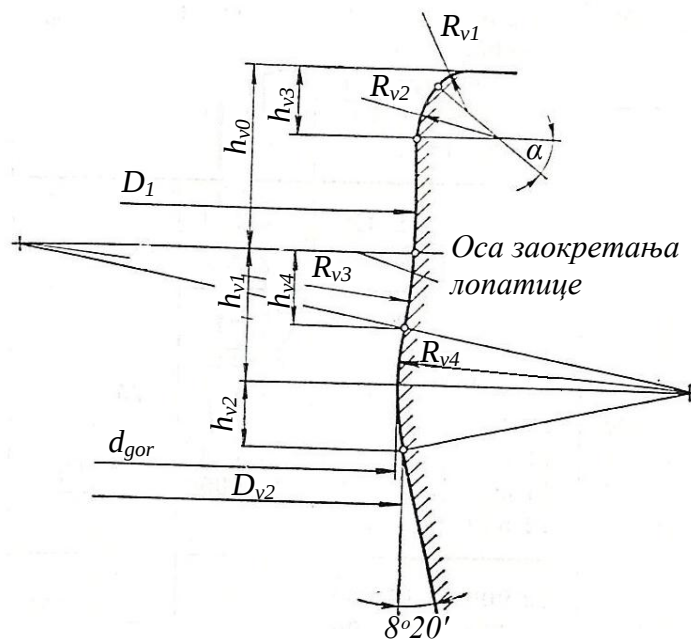
$$h_{v3} = 0,081 \cdot D_1 = 0,081 \cdot 3200 = 259,2 \text{ mm} \quad (57)$$

$$h_{v4} = 0,087 \cdot D_1 = 0,087 \cdot 3200 = 278,4 \text{ mm} \quad (58)$$

$$d_{gor} = 0,973 \cdot D_1 = 0,973 \cdot 3200 = 3113,6 \text{ mm} \quad (59)$$

$$D_{v2} = 0,981 \cdot D_1 = 0,981 \cdot 3200 = 3139,2 \text{ mm} \quad (60)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h_{v3} - R_{v1}}{R_{v2} - R_{v1}}\right) = \arcsin\left(\frac{259,2 - 160}{320 - 160}\right) = 38,32^\circ \quad (61)$$



Слика 45 - Геометрија доњег венца кућишта, [38]

4.4.5 Спроводни апарат

Спроводни апарат састоји се од система покретних хидраулички профилисаних лопатица смештених између два паралелна венца у кружну решетку. При повећању отвора спроводног апарата, повећава се проток, а тиме и снага турбине, [39].



Слика 46 - Лопатице спроводног апарата, [48]

Усвојена турбина ПЛ10 садржи $z_{sa} = 24$ лопатице спроводног апарата типа У1-20-1, [38].

Пречник кружне осе смештаја лопатица спроводног апарата износи, [38]:

$$D_0 = 3750 \text{ mm}$$

Бездимензијска максимална дебљина профила $\bar{\delta}_{sa_max}$ лопатица спроводног апарата одређује се у зависности од пречника D_0 и максималног пада H_{max} . Према препоруци ЛМЗ-а, максимална дебљина износи $\bar{\delta}_{sa_max} = 0,22$, [39].

Корак лопатица спроводног апарата, [25]:

$$t_{sa} = \frac{\pi \cdot D_0}{z_{sa}} = \frac{\pi \cdot 3750}{24} = 490,88 \text{ mm} \quad (62)$$

Дужина тетиве скелетнице профила лопатице спроводног апарата, [39]:

$$\frac{l_{sa}}{t_{sa}} = 1,07 \Rightarrow l_{sa} = t_{sa} \cdot 1,07 = 490,88 \cdot 1,07 = 525,24 \text{ mm} \quad (63)$$

Лопатице су одливане од мартензитног хромовог челика (GX4CrNi13-4). Завршна обрада изводи се на нумеричким машинама примењујући CNC стругање, [39].

Механизам за заокретање лопатица, слика 47, се састоји од система полуга и хидрауличног цилиндра са двоструким деловањем. Ови цилиндри се посебно израђују за примену у води. Садрже нерђајући челик X5CrNi18-10, месинг и хромирану клипњачу.



Слика 47 - Механизам за заокретање лопатица спроводног апарата, [49]

4.4.6 Спирална уводна комора

Воду из цевовода прихвата метална уводна комора која је спиралног облика. Овакав облик омогућава равномерно распоређивање воде по обиму, мање губитке, већи степен искоришћења и мање димензије.

Обухватни угао спирале φ_0 за Каплан турбину, и нето пад 5-15 m износи, [39]:

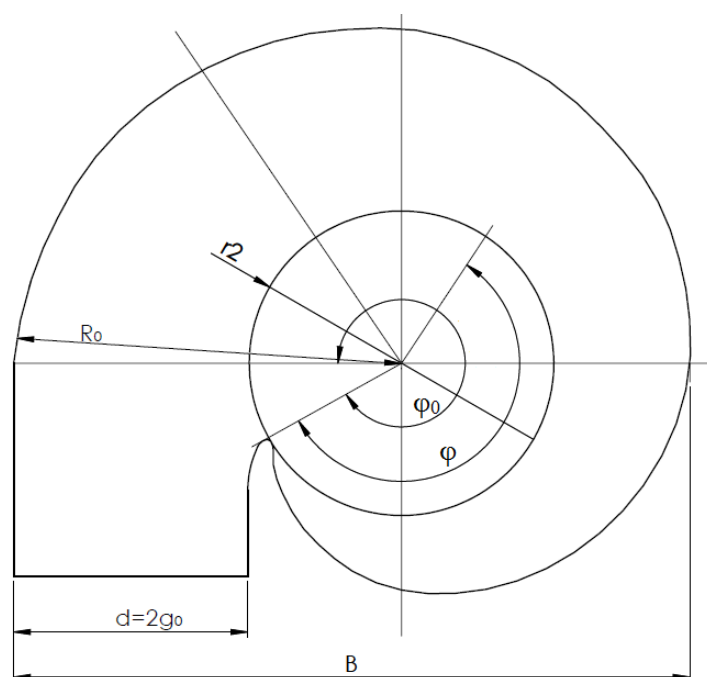
$$\varphi_0 = 180^\circ$$

Значајну улогу у доводу воде има и угао δ_{SL} вектора брзине на улазу у спроводни апарат према обимском правцу. Према ЛМЗ препоруци, он износи, [39]:

$$\delta_{SL} = 40^\circ$$



Слика 46 - Спирала Капланове турбине, [50]



Слика 47 - Облик и основне димензије спирале, [39]

Оријентационе вредности спирале ЛМЗ добију се на основу пречника радног кола D_1 , [39]:

$$R_0 = (1,6 \div 1,65) \cdot D_1 = 1,625 \cdot 3200 = 5200 \text{ mm} \quad (64)$$

$$B = R_0 + 0,95 = 5,2 + 0,95 = 6150 \text{ mm} \quad (65)$$

$$r_1 = D_1 \cdot 0,95 = 3200 \cdot 0,95 = 3040 \text{ mm} \quad (66)$$

$$r_2 = D_1 \cdot 0,69 = 3200 \cdot 0,69 = 2208 \text{ mm} \quad (67)$$

$$r' = D_1 \cdot 0,1 = 3200 \cdot 0,1 = 320 \text{ mm} \quad (68)$$

$$b = (1,6 \div 1,8) \cdot (R_0 - r_1) = 1,7 \cdot (5200 - 3040) = 3672 \text{ mm} \quad (69)$$

$$b_0 = b_{sa} + 0,0033 = 0,576 + 0,0033 = 0,5793 \text{ mm} \quad (70)$$

Средња брзина у спирали:

$$c_{u\varphi 0} = 1,93 \cdot H_n^{0,33} = 1,93 \cdot 10,255^{0,33} = 4,16 \text{ m/s} \quad (71)$$

Полупречник улазног пресека:

$$g_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot \varphi_0}{c_{u\varphi 0} \cdot 2 \cdot \pi^2} - \frac{b_0'}{\pi} \cdot (r_1 - r_2)} \quad (72)$$

$$g_0 = \sqrt{\frac{6,44 \cdot 180}{4,16 \cdot 2 \cdot \pi^2} - \frac{0,5793}{\pi} \cdot (3,040 - 2,208)} = 1996,53 \text{ mm}$$

4.4.7 Статор турбине

Статор турбине састоји се од система профилисаних цилиндричних лопатица распоређених у кружну решетку, на излазу из спирале. Лопатице су непокретне и чврсто повезане за горњи и доњи венац. Његова улога је двојака: да у свом проточном простору обликује струјни ток испред спроводног апарата, стварајући услове осносиметричног униформног струјања и да преко лопатица на фундамент пренесе аксијална оптерећења хидроагрегата, [39].

Број лопатица статора z_{sl} бира се у зависности од конструкције турбинске уводне коморе - спирале и броја лопатица спроводног апарата z_{sa} .

Статори металних спирала кружног пресека, по препоруци произвођача турбина ЛМЗ, имају 19 или 23 лопатица, [39]. Усваја се: $z_{sl} = 19$.

4.4.8 Криволинијски сифон

По излазу из радног кола, вода пролази кроз сифон до изласка из турбине. Они могу имати различите геометријске облике, а усваја се криволинијски дифузорски сифон.

Све величине сифона са слике 48, према ЛМЗ, [39] сведене су на пречник радног кола D_1 .

$$h = D_1 \cdot 2 = 3200 \cdot 2 = 6400 \text{ mm} \quad (73)$$

$$\beta = (8 \div 11^\circ). \text{ Усваја се } \beta = 10^\circ.$$

$$L = D_1 \cdot 4 = 3200 \cdot 4 = 12800 \text{ mm} \quad (74)$$

$$B = D_1 \cdot 2,5 = 3200 \cdot 2,5 = 8000 \text{ mm} \quad (75)$$

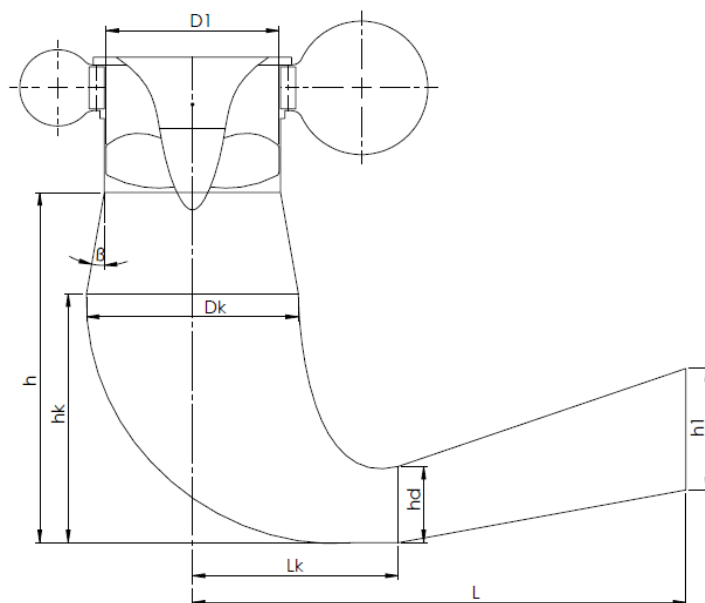
$$h_k = D_1 \cdot 0,9 = 3200 \cdot 0,9 = 2880 \text{ mm} \quad (76)$$

$$L_k = D_1 \cdot 1,2 = 3200 \cdot 1,2 = 3840 \text{ mm} \quad (77)$$

$$D_k = D_1 \cdot 1,2 = 3200 \cdot 1,2 = 3840 \text{ mm} \quad (78)$$

$$h_d = D_1 \cdot 0,58 = 3200 \cdot 0,58 = 1856 \text{ mm} \quad (79)$$

$$h_1 = D_1 \cdot 1,15 = 3200 \cdot 1,15 = 3680 \text{ mm} \quad (80)$$



Слика 48 - Криволинијски сифон Каплан турбине, [39]

4.5 Избор генератора

За претварање механичке енергије у електричну усваја се синхрони генератор са 500 min^{-1} (6 пари полова) јер је број обртаја на турбини $175,12 \text{ min}^{-1}$. Ако би се усвојио генератор са већим бројем обртаја $600, 750 \text{ min}^{-1}$ био би потребан већи преносник, који је много скупљи од мањег, [51].

Дакле, број обртаја генератора зависи од броја пари полова и он износи:

$$n_G = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ min}^{-1} \quad (81)$$

Номинална електрична активна снага се одређује на основу израза (19) при чему је степен искоришћења генератора $\eta_G = 0,960$:

$$P_G = P_T \cdot \eta_G = 570,129 \cdot 0,96 = 547,324 \text{ kW} \quad (82)$$

На основу ових параметара усваја се генератор домаћег произвођача АТБ - Север Суботица, са следећим карактеристикама, [52]:

- ❖ тип генератора: GSOTE 630 Lk-12,
- ❖ активна снага: $P_G = 550 \text{ kW}$,
- ❖ привидна снага: $S_G = 688 \text{ kW}$,
- ❖ називни фактор снаге који одређује способност генератора да производи реактивну снагу: $\phi = 0,80$,
- ❖ момент инерције ротора: $J = 265 \text{ kgm}^2$,
- ❖ номинална струја арматуре: $I_n = 993 \text{ A}$,
- ❖ линијски напон: $U_G = 690 \text{ kV}$,

- ❖ веза намотаја: Y ,
- ❖ називни број обротаја: $n_G = 500 \text{ min}^{-1}$,
- ❖ побег / време трајања: $1000/5 \text{ min}^{-1}$,
- ❖ смер обртања: *десни*,
- ❖ маса генератора: $G_G = 6800 \text{ kg}$.

Обртни момент усвојеног генератора:

$$T = \frac{60 \cdot P_G}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{60 \cdot P_G}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{60 \cdot 550000}{2 \cdot \pi \cdot 500} = 10504,226 \text{ Nm} \quad (83)$$

4.6 Избор мултипликатора

За пренос обртног момента од турбине до генератора усваја се вертикални једноступени мултипликатор са хеликоидним зупчаницима који су постављени на паралелним вратилима. Улазно вратито мултипликатора, гледано од турбинског вратила, је изведено са прирубницом.

Овај тип преносника одликује бешуман рад у односу на пужне, као и велики степен искоришћења.

Избор мултипликатора ће се извршити у складу са препорукама Чешког произвођача *Wikow* који је конструисао посебан тип мултипликатора *ZP-V* за вертикалне Каплан турбине.

Потребан преносни однос мултипликатора:

$$i_M = \frac{n_G}{n_T} = \frac{500}{175,12} = 2,855 \quad (84)$$

Потребна снага мултипликатора, [53]:

$$P_M = P_T \cdot f \quad (85)$$

где је:

$f = f_1 \cdot f_2$ - коефицијент преноса,

f_1 - коефицијент рада машине,

f_2 - коефицијент који се одређује на основу броја стартовања на сат.

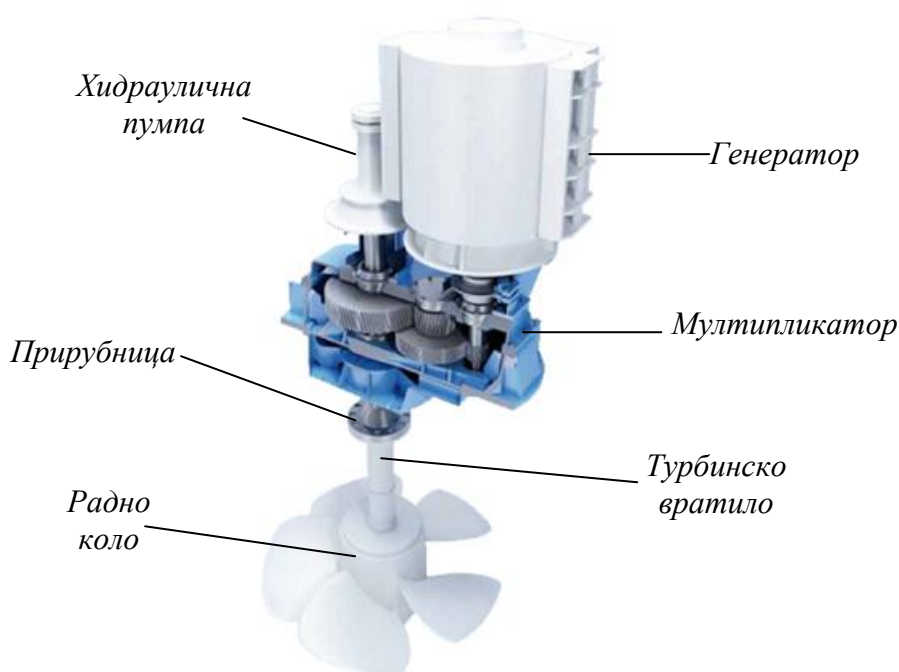
Према препоруци произвођача, $f_1 = 1,5$ за тешке услове рада и хидротурбине, а $f_2 = 1$, за једно стартовање у једном сату, [53]. Заменом у претходни израз добија се потребна снага мултипликатора:

$$P_M = P_T \cdot f = 570,129 \cdot 1,5 = 855,193 \text{ kW}$$

На основу рачунске вредности преносног односа $i_M = 2,855$ и улазне номиналне снаге $P_M = 855,193 \text{ kW}$, улазног броја обртаја турбине $n_T = 178,66 \text{ min}^{-1}$ усваја се мултипликатор са следећим карактеристикама, [53]:

- ❖ номинална снага: $P_M = 983 \text{ kW}$,

- ❖ стварни преносни однос: $i_{Mstv} = 2.8$,
- ❖ улазан број обртаја: $n_T = 178,57 \text{ min}^{-1}$,
- ❖ излазан број обртаја: $n_G = 500 \text{ min}^{-1}$.



Слика 49 - Пресек хеликоидног вертикалног мултипликатора са турбином и генератором, [54]

4.7 Избор турбинског вратила

Вратило вертикалних турбина је шупљи цилиндар са прирубницама на обе стране за преношење обртног момента са радног кола на генератор. У овом случају, вертикално вратило преноси обртни момент од радног кола до мултипликатора.

Спајање главчине радног кола, односно прирубнице мултипликатора са прирубницама вертикалног вратила се остварује помоћу завртњева који су оптерећени на истезање и смицање. Између чеоних контактних површина прирубница се поставља гумени прстен како би се обезбедило заптивање, [47].

Кроз шупље вертикално вратило пролази цев кроз коју се креће уље под притиском за напајање серво мотора за заокретање лопатица радног кола. Ова цев се ослања помоћу клизних лежишта од ливеног гвожђа и бронзане облоге на унутрашњи зид шупљег вратила, [47].

Димензије прирубнице и завртањске везе треба изабрати према димензији главчине радног кола и према препорукама, [47], а напони се морају контролисати:

$$d_v = 800 \text{ mm}$$

$$d_0 = 0,5 \cdot d_v = 0,5 \cdot 800 = 400 \text{ mm} \quad (86)$$

$$d_a = 0,9 \cdot d_v = 0,9 \cdot 800 = 720 \text{ mm} \quad (87)$$

$$r = 0,1 \cdot d_v = 0,1 \cdot 800 = 80 \text{ mm} \quad (88)$$

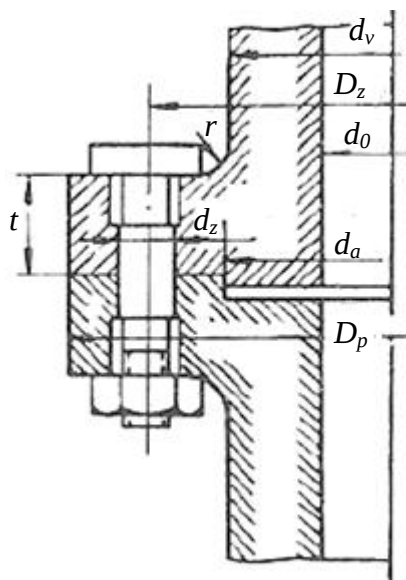
$$D_p = 1230 \text{ mm}$$

$$t = 170 \text{ mm}$$

$$D_z = 1045 \text{ mm}$$

$$z = 20 \text{ завртњева M80}$$

$$d_z = 85 \text{ mm}$$



Слика 50 - Основне геометријске мере турбинског вратила, [47]

Вратило се израђује заваривањем цилиндричног дела и прирубница који су ливени од челичног лива 20Mn5. Прелаз попречног пресека са прирубнице на цилиндричан део вратила је коничан, [47].

Контрола напона на турбинском вратилу извршиће се у програмском пакету *Autodesk Inventor Professional 2014* у следећем поглављу.

4.8 Машинска зграда

На основу претходно израчунатих и усвојених типова и димензија турбине и генератора, усваја се машинска зграда типа По+П, димензије 9,5 x 12,5 m испод које се налази одводни криволинијски сифон.

Машинска зграда састоји се из једне просторије у којој је смештен агрегат, нисконапонски-управљачко разводни орман, бројило електричне енергије, портална дизалица и противпожарни апарати као и кућни трансформатор са сабирницама и осталом средњенапонском електро-опремом.

У подрумском делу се налазе турбине и машинска опрема.

Зграда биће израђена у складу са околном архитектуром, а материјали који ће бити уграђени у њу одговараће околној средини и у складу са урбанистичко-техничким условима. Основни захтев је да се машинска зграда својим конструктивним решењем не истиче од околног простора.

Рад у машинској згради је аутоматски па због тога није запоседнут већом радном снагом. Надзор функционисања хидроелектране вршиће два радника у две смене.

На основу препорука за изградњу хидроелектрана малих снага и с обзиром на инсталисану снагу и врсту генератора, већ поменуте аутоматизације, хидроелектрана ће имати реализоване следеће заштите:

- 1) турбинске заштите: заштиту од превелике брзине (заштиту од побега агрегата), термичку заштиту лежајева турбинског вратила, заштиту од пада притиска у систему турбинске регулације, заштиту од превелике температуре уља у хидрауличком систему.
- 2) генераторске заштите: краткоспојну, прекострујну (заштиту од преоптерећења) поднапонску, заштиту од несиметрије, заштиту од повратне снаге, термичку заштиту лежајева генератора, термичку заштиту намотаја генератора.
- 3) заштите електромашинске зграде од потапања.

Грејање се врши зидним калорифером снаге 1,5 kW. што се тиче опасности од мржњења, код турбине типа Каплан не може да дође до замрзавања воде и оштећења радног кола и лопатица турбине јер се вода не задржава у турбини.

Вентилација машинске зграде је предвиђена природним путем, преко прозора и врата.

Уземљење ће бити изведено као темељни уземљивач од поцинкованих челичних трака минималног попречног пресека 100 mm^2 (25 x 4 mm).

Громобранска заштита хидроелектране биће изведена у облику мреже направљене он поцинкованих челичних трака и постављене на крову машинске зграде. Хватаљке и земљоводи ће бити направљени од поцинкованих трака 20 x 3 mm.

Управљачко-расклопни ормар ГРО је израђен од декапираног челичног лима и уграђује се на зид. Прилаз ормару је омогућен са предње стране. Ормар се предвиђа за управљање хидроелектраном, мерење електричних и неелектричних параметара хидроагрегата, развод главног и сигурносног напајања, сигнализацију и заштиту агрегата. Има следеће могућности:

- ❖ ручно управљање, синхронизација и регулација и аутоматска регулација при паралелном раду са мрежом,
- ❖ аутоматско управљање, синхронизација, регулација и заштита при паралелном раду са мрежом.

И поред чињенице да је хидроелектрана пројектована да ради паралелно са мрежом, неопходно је да поседује аутономан извор електричне енергије. Овај захтев се стандардно решава применом сигурносног напајања. Аку-батерија служи као главно напајање аутоматике и хидроагрегата. Напоуњавање батерије врши се аутоматски из разводног поља помоћу регулисаног исправљача. Узимајући у обзир величину хидроелектране као и очекивану потрошњу опреме предвиђене да се напаја од стране сигурносног напајања, сигурносно напајање се састоји од следећих делова:

- ❖ аутоматски регулисаног исправљача 24 V, 30 A,
- ❖ оловне суве безодржавајуће акумулаторске батерије 24 V, 140 Ah,
- ❖ одговарајег развод сигурносног напајања.

Аутоматски регулисани исправљач обезбеђује мерење и приказ одговарајућих параметара батерије како би се у сваком тренутку могао имати увид у њено стање.

5. АНАЛИЗА ВРАТИЛА ТУРБИНЕ

Свеобухватан и тачан прорачун напонског стања при конструисању машинских елемената представља главни чинилац који утиче на радни век, експлоатацијску поузданост, енергетску ефикасност машинског елемента. Ова чињеница је посебно важна код преносника снаге јер се као главни узрочник губитка функције јављају прслине настале различитим, по правилу неизбежним, изворима концентracије напона.

Дугогодишња пракса коришћења стандардне методе прорачуна уз примену одговарајућих фактора концентracија заправо замагљује чињеницу да су оригинални Петерсенови (енг. *R. E. Peterson*) фактори били заправо оквирне инжењерске апроксимације. Изворно, расположиви аналитички алат који је Петерсон имао на располагању га је заправо усмеравао да своја израчунавања заснива на сличности, а не на директном израчунавању напонског стања око извора концентracије напона. Ово истовремено наглашава ограниченост примене Петерсонових фактора концентracије напона K , [55].

Модерне аналитичке и нумеричке методе могу да обезбеде знатно прецизнија и једноставнија решења када је реч о израчунавању фактора концентracије напона. Многи аутори користе методу коначних елемената (МКЕ) у циљу превазилажења непоузданости резултата добијених коришћењем Петерсонових дијаграма. Такође МКЕ разрешава дилему да ли је боље израчунавање напона за свако оптерећење посебно или израчунавање сложеног напонског стања преко истовременог задавања свих оптерећења у модел. Ова дилема посебно добија на тежини када се зна да поједине геометрије излазе из оквира Петерсонових дијаграма јер за појединачне комбинације димензија - оптерећење не постоје дијаграми. Управо због тога, примена МКЕ у таквим случајевима је назамењив, [55].

5.1 Аналитички прорачун вратила

Вертикално турбинско вратило је само оптерећено на увијање и затезање, [47]. Момент увијања се одређује на основу израза:

$$T_t = \frac{30 \cdot P_t}{\pi \cdot n_T} = \frac{30 \cdot 570,129 \cdot 10^3}{\pi \cdot 178,57} = 30488,497 \text{ Nm} \quad (89)$$

где су:

$n_T = 178,57 \text{ min}^{-1}$ - број обртаја радног кола и турбинског вратила,

$P_T = 570,129 \text{ kW}$ - снага турбине.

Напрезање на затезање изазива аксијална сила на радном колу и сопствена тежина радног кола и турбинског вратила, [47]. Аксијална сила на радном колу је претходно израчуната и она износи:

$$F_a = 151002,921 \text{ N}$$

Тежина вратила се може програмски одредити на основу просторног модела за који је задат материјал 20Mn5, па она износи:

$$G_V = 19983,302 \cdot 9,81 = 196036,193 \text{ N} \quad (90)$$

Тежина радног кола са лопатицама и механизмом за заокретање лопатица се оријентационо усваја за пречника радног кола $D_1 = 3200 \text{ mm}$ на основу већ конструисаних радних кола Каплан турбина истог пречника, па она износи:

$$G_{RK} = 7000 \cdot 9,81 = 68670 \text{ N} \quad (91)$$

Напон услед увијања се аналитички одређује на основу израза:

$$\tau = \frac{T_t}{W_p} \quad (92)$$

где су:

T_t - момент увијања

W_p - отпорни момент попречног пресека

Отпорни момент попречног пресека шупљег вратила се одређује на основу израза:

$$W_p = \frac{\pi}{16 \cdot d_v} \cdot (d_v^4 - d_0^4) \quad (93)$$

$$W_p = \frac{\pi}{16 \cdot 800} \cdot (800^4 - 400^4) = 94.247.779,61 \text{ mm}^3$$

Заменом вредности у израз (92) добија се вредност напона увијања:

$$\tau = \frac{30.488.497}{94.247.779,61} = 0,32349 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Напон услед затезања се аналитички одређује на основу израза:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{4 \cdot (Fa + G_V + G_{RK})}{\pi \cdot (d_v^2 - d_0^2)} \quad (94)$$

$$\sigma_z = \frac{4 \cdot (151002,921 + 196036,193 + 68670)}{\pi \cdot (800^2 - 400^2)} = 1,10270 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Укупан напон на вратилу се одређује на основу израза:

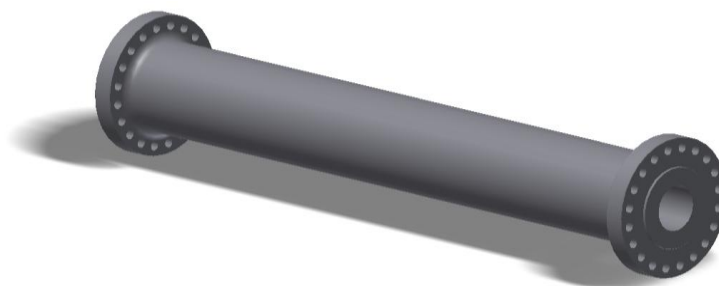
$$\sigma = \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau^2} \quad (95)$$

$$\sigma = \sqrt{1,10270^2 + 4 \cdot 0,32349^2} = 1,27848 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1,27848 \text{ MPa}$$

5.2 Прорачун вратила методом коначних елемената

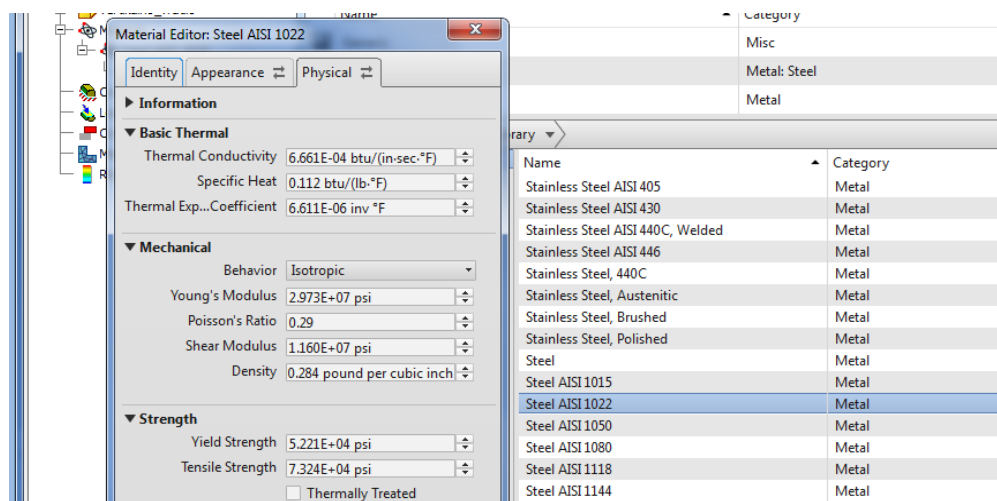
Прорачун напонског стања турбинског вертикалног вратила нумеричким путем извршиће се коришћењем методе коначних елемената (МКЕ), помоћу програмског пакета *Autodesk Inventor Professional 2014*.

Облик и мере вратила су дефинисане према претходно добијеним димензијама турбинског вратила на основу препоручених односа. На слици 51. приказан је просторни модел вратила.



Слика 51 - Просторни модел турбинског вратила урађен у Autodesk Inventor

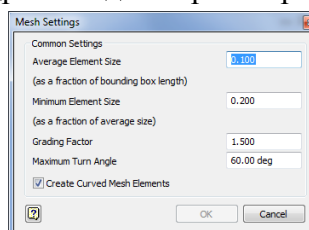
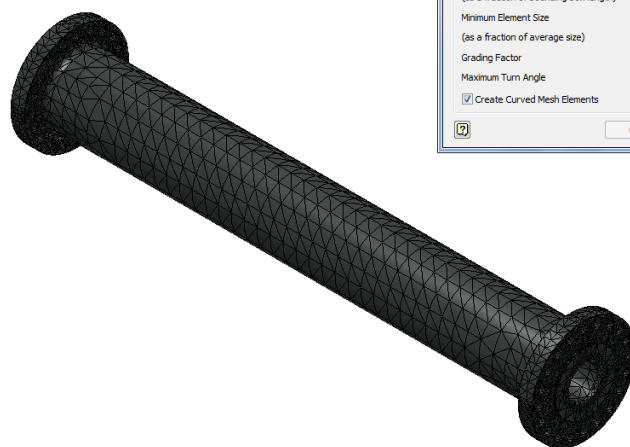
Први улазни параметар за прорачун методом коначних елемената је дефинисање материјала, па како је усвојени материјал турбинског вратила челични лив 20Mn5 у програму се усваја исти материјал, односно AISI 1022 због подешеног стандарда.



Слика 52 - Дефинисање карактеристика материјала у Autodesk Inventor-у

Модел приказан на слици 53. представља дискретизован континуум са 3D елементима са 8 чворова и три степена слободе у сваком чвору (померање у смеру x, y, z оса координатног система). Овај модел се састоји од 74836 чворова и 46987 елемената. Мрежа је изведена као осносиметрична, што омогућује једноставно праћење напонског стања на прелазном радијусу од цилиндричног дела према прирубници.

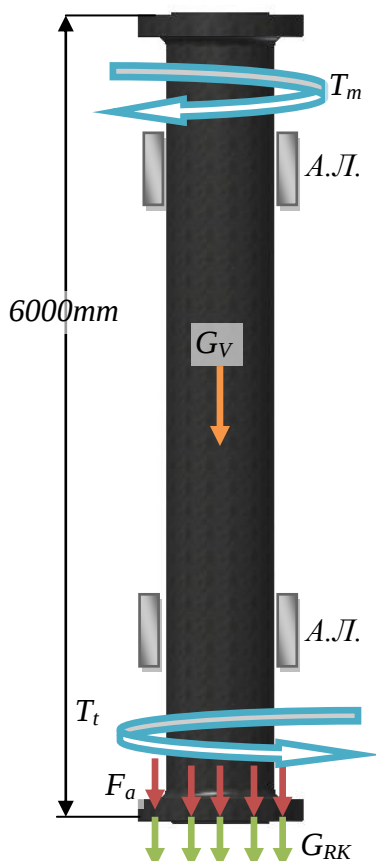
Nodes: 74836
Elements: 46987



Слика 53 - Изглед просторног МКЕ модела турбинског вратила са мрежом

5.3 Оптерећења и ограничења

На слици 54 се види начин дефинисања спољашњег оптерећења. Аксијална сила F_a симулирана је силама у тачкама повезивања прирубнице вратила са радним колом.



Слика 54 - Шематски приказ оптерећења вертикалног турбинског вратила

Сопствена тежина вратила G_v је симулирана задавањем гравитационе силе у смеру осе у глобалног координатног система.

Тежина радног кола G_{RK} , редукована је на тачке повезивања прирубнице вратила са радним колом.

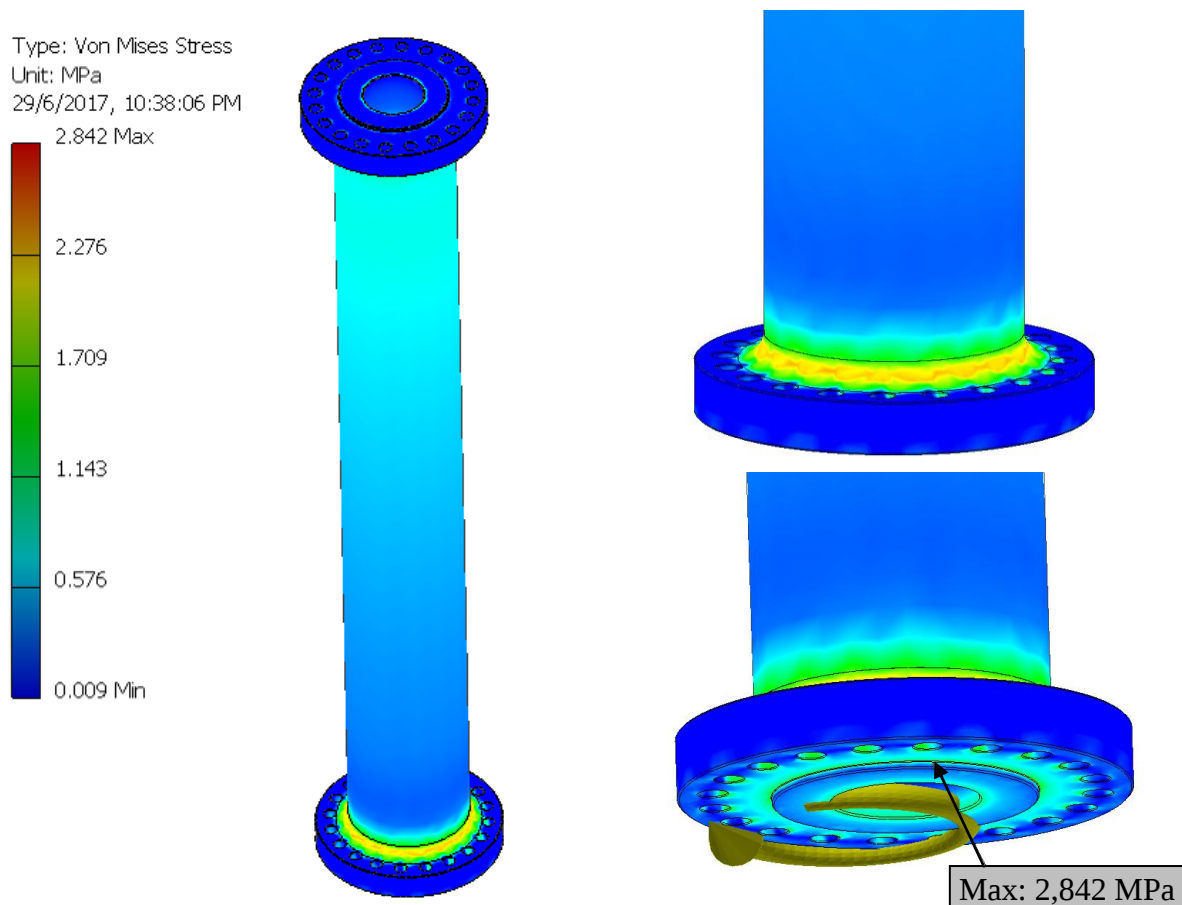
Обртни момент симулиран је у аксијалном правцу у свим чворовима по обиму прирубнице вратила, тако да укупни момент увијања од ових сила представља обртни момент.

Ограничења померања су постављена у аксијалном правцу на месту аксијалних лежаја. Такође, ограничена су и померања тачака спајања друге прирубнице вратила са мултипликатором.

5.4 Нумерички резултати

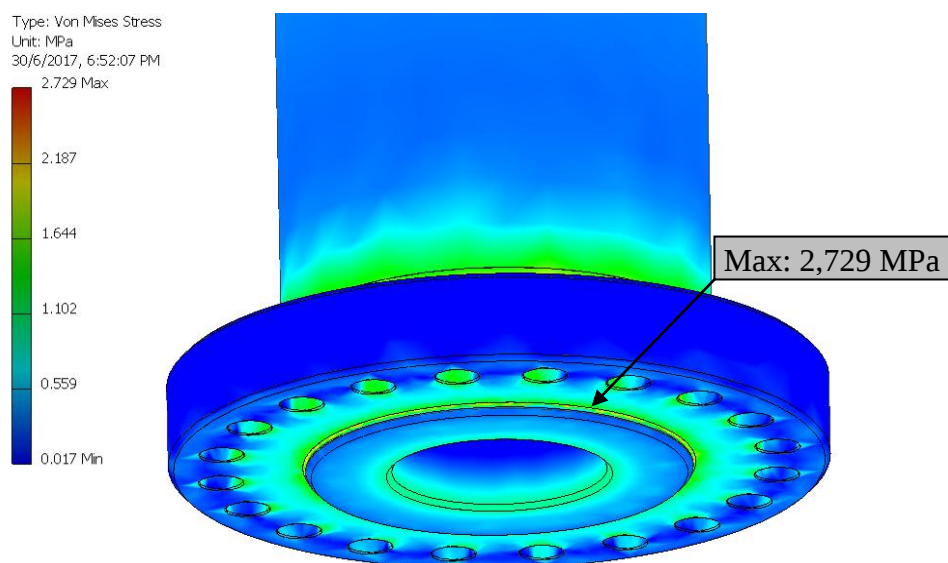
Добијени нумерички резултати за напонско стање су приказани на слици 55. Максимални напон се јавља на месту радијуса $r=2\text{mm}$ испупченог дела вратила пречника $d_a = 720\text{mm}$ код прирубнице која се спаја са радним колом, и његова вредност износи 2,842 МПа.

Добијени резултати су очекивани, јер је то најмањи спољашњи пречник вратила, а у аналитичкој провери напонског стања није узет у обзир.



Слика 55 - Еквивалентни напони током оптерећења за радијуса $r=2\text{mm}$

Повећањем вредности радијуса између прирубнице и исупченог дела вратила на $r=5\text{mm}$, вредност овог напона се смањује. Такође, променом вредности радијуса мењају се и параметри мреже коначних елемената, тако да је сада модел садржи 54384 чворова и 33620 елемената.



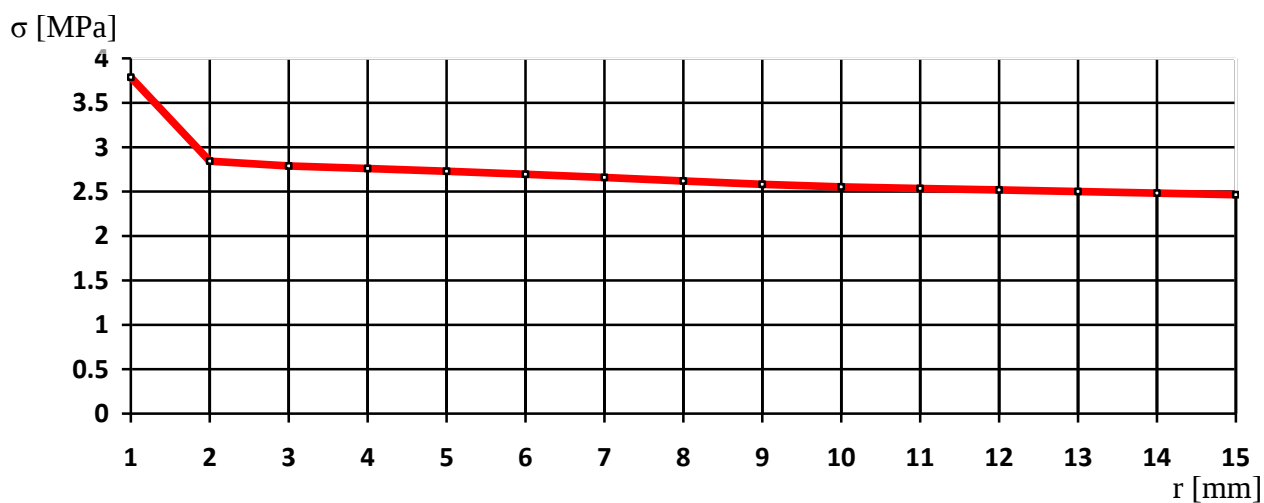
Слика 55 - Еквивалентни напони током оптерећења за радијуса $r=5\text{mm}$

На основу већег броја анализа формирана је табела 9. у којој је приказана промене напона у зависности од промене радијуса између испупченог дела вратила и прирубнице.

Табела 9 - Вредности напона у зависности од радијуса r

r [mm]	1	2	3	4	5	6	7	
σ [MPa]	3.787	2.842	2.788	2.759	2.729	2.694	2.658	
r [mm]	8	9	10	11	12	13	14	15
σ [MPa]	2.620	2.582	2.553	2.535	2.518	2.500	2.483	2.465

Ради лакшег прегледа добијених резултата, табела је илустрована дијаграмом 1.



Дијаграм 1 - Промене напона у зависности од промене радијуса између испупченог дела вратила и прирубнице

6. ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА ПРОЈЕКТА

У овом поглављу, биће спроведена оцена исплативости за изградњу и коришћење хидроелектране мале снаге. Она се врши на основу цене укупне произведене електричне енергије која се продаје ЕПС-у и улагања за изградњу и одржавање хидроелектране. Основни циљеви оцене исплативости су:

- ❖ да се установи да ли је пројекат финансијски исплатив и економски оправдан,
- ❖ да се омогући инвеститорима, финансијским институцијама и донаторима да оцене прихватљивост пројекта за финансирање.

6.1 Трошкови изградње хидроелектране

Трошкови изградње хидроелектране укључују анализу свих фиксних и варијабилних трошкова као што су: административни трошкови, трошкови пројектовања, трошкови изградње неопходне инфраструктуре, трошкове предложених технологија и опреме, оперативне трошкове, трошкове радне снаге, трошкове одржавања и удаљеност локације хидроелектране од електроенергетске инфраструктуре, односно трошкове прикључења на постојећу електро-енергетску мрежу.

НАПОМЕНА: Трошкови изградње хидроелектране приказани у овом раду су оквирни, а добијени су на основу упита произвођача компоненти и извођача комплетних пројеката хидроелектране.

Табела 10 - Вредност инвестиције

Ставка	Износ у €	Век трајања (година)
Пројекти, дозволе, надзор	45.000	
Инфраструктура	85.000	30
Грађевински радови	195.000	30
Технолошка опрема	840.000	30
Концесија за год. дана унапред	35.000	
Трајна обртна средства	42.000	
УКУПНО	1.242.000	

6.2 Годишњи приход хидроелектране

Просечна годишња производња електричне енергије из хидроелектране малих снага одређује се на основу времена рада постројења у години T и средњег протока $Q_{sr} = 4,29 \text{ m}^3/\text{s}$ који је узет у обзир у изразу за снагу:

$$E_{god} = S_G \cdot T = \frac{P_G}{\cos \phi} \cdot T = \frac{\eta_G \cdot \eta_T \cdot 9,81 \cdot Q_{sr} \cdot H_n}{\cos \phi} \cdot T$$

$$E_{god} = \frac{0,96 \cdot 0,88 \cdot 9,81 \cdot 4,29 \cdot 10,255}{\cos 0,80} \cdot 4000 = 1.458.539,50 \text{ kWh}$$

Подстицајана откупна цена за произведену електричне енергију утврђује се у зависности од врсте и инсталисане снаге електране, као и максималног ефективног времена рада за одговарајућу врсту електране. За инсталисану снагу хидроелектране од 0,5 до 1 MW, према "Уредби о подстицајним мерама за производњу електричне енергије из обновљивих извора и из високоефикасне комбиноване производње електричне и топлотне енергије" из 2016. године износи 10,60 (с€/kWh), [56].

Укупан годишњи приход хидроелектране од продаје електричне енергије ЕПС-у износи:

$$\sum P = 1.458.539,50 \cdot 0,106 = 154.605,19 \text{ €}$$

6.3 Годишњи расходи хидроелектране

Годишњи расходи хидроелектране узимају у обзир: плате запослених, одржавање хидро-електро-машинске опреме, машинске зграде, чишћење бране, цевовода и друга одржавања, трошкове амортизације као и остале трошкове.

Рад у машинској згради је аутоматизован па због тога није потребна већа радна снага. Надзор функционисања хидроелектране врше два радника у две смене, а сва одржавања изводе предузећа специјализована у овој области.

Табела 11 - Годишњи расходи хидроелектране

Ставка	Износ у €
Бруто плате	1.160
Одржавање	40.000
Остали расходи	9.000
УКУПНО	50.160

6.4 Оцена економске исплативости

На основу претходно одређених параметара, може се израчунати коефицијент снаге, који претставља однос цене постројења и максималне ефективне снаге постројења, [57]:

$$c_P = \frac{1.242.000}{547,377} = 2.269,00 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

Коефицијент енергије је однос цене постројења и годишње енергетске производње постројења и он износи, [57]:

$$c_E = \frac{1.242.000}{1.458.539,50} = 0,851 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Као додатни коефицијент за оцену исплативости хидроелектране користи се тзв. време коришћења инсталисане снаге, које претставља однос годишње производње енергије и номиналне снаге постројења, [57]:

$$c_h = \frac{1.458.539,50}{547,377} = 2.665 \text{ h}$$

Теоријско време повратка уложеног капитала за изградњу и функционисање хидроелектране износи, [57]:

$$\tau = \frac{c_E}{0,106} = \frac{0,851}{0,106} = 8,03 \text{ год}$$

Добијене вредности претходно израчунатих коефицијената показују да је пројекат врло добре економске исплативости, јер је време повратка уложених средстава мање од века експлоатације пројекта.

7. РЕАЛИЗАЦИЈА ПРОЈЕКТА

Циљ овог поглавља је да дефинише акциони план реализације пројекта предложене мале хидроцентрале "Рибаре". Важно је напоменути да се поједини кораци у предложеном акционом плану делимично или у потпуности временски поклапају, те да је неопходно адекватно вођење пројекта како би се уклопио велики број различитих активности.

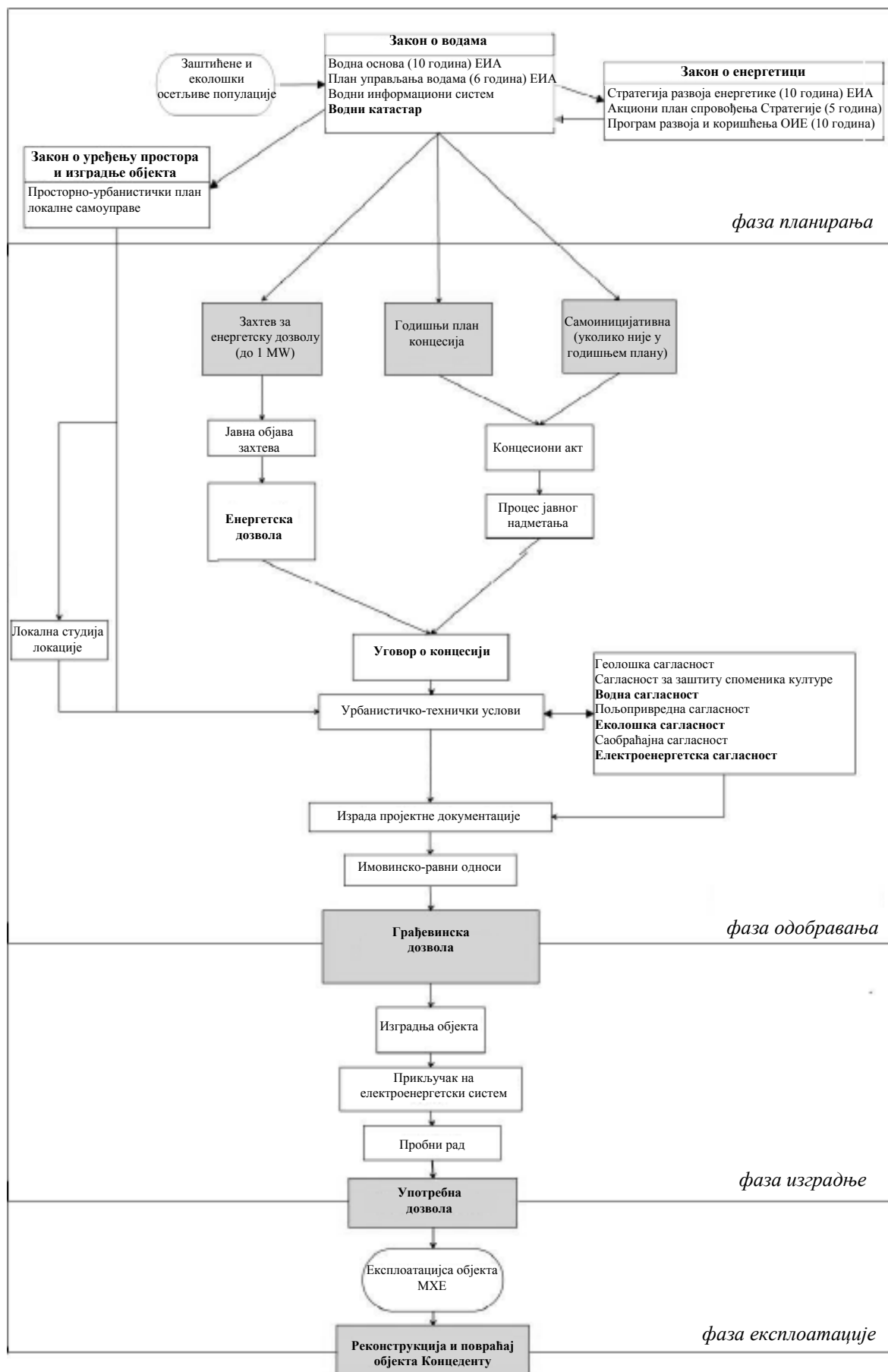
1. Потписивање уговора о сарадњи на реализацији пројекта мале хидроелектране "Рибаре" између општине Жагубица и инвеститора. За овај корак су задужени надлежни општински органи и менаџмент инвеститора.
2. Израда хидролошке процене на делу водотока реке Млаве од интереса за изградњу мале хидроелектране. За овај корак инвеститор треба да ангажује хидролога са лиценцом. Ангажовани хидролог ће бити одговоран за квалитет урађене студије.
3. Израда генералног пројекта хидроелектране. За овај корак инвеститор мора да ангажује пројектантску кућу са искуством у изради оваквих пројеката. Ангажована пројектантска кућа ће бити одговорна за квалитет урађеног пројекта.
4. Решење имовинско-правних односа на локацији предвиђеној за изградњу хидроелектране. У оквиру овог поглавља инвеститор мора да са сваким појединачним власником земљишта у зони од интереса постигне договор о форми по којој ће се решити имовинско-правни односи. У овом послу општина Жагубица би требало да буде посредник између инвеститора и појединачних власника, како би се на крају постигао задовољавајући договор за обе стране.
5. Доношење генералног плана и плана детаљније регулације за локацију предвиђену за изградњу хидроелектране. За овај корак је задужена општина Жагубица која би на основу раније реализованих корака требало да донесе овакав акт.
6. Издавање локацијске дозволе. За овај корак је задужена општина Жагубица која би на основу раније реализованих корака требало да донесе овакав акт.
7. Израда свих неопходних подлога за израду идејног пројекта. Подлоге које треба урадити у оквиру овог корака су:
 - ❖ геолошка процена терена,
 - ❖ процена утицаја на животну средину.

За израду неопходних подлога инвеститор треба да ангажује стручњаке са лиценцом који ће бити одговорни за квалитет пројекта. Уобичајено је да се за израду ових студија ангажује иста пројектантска кућа која је реализовала генерални пројекат и која ће реализовати идејни и главни пројекат.

8. Израда идејног пројекта. За овај корак инвеститор мора да ангажује пројектантску кућу са искуством у изради оваквих објеката. Ангажована пројектантска кућа ће бити одговорна за квалитет урађеног објекта.

9. Прибављање одобрења за градњу. На основу идејног пројекта надлежни орган општине Жагубица издаје овај документ.
10. Израда главног пројекта. За овај корак инвеститор мора да ангажује пројектантску кућу са искуством у изради оваквих објеката. Ангажована пројектантска кућа ће бити одговорна за квалитет изграђеног објекта.
11. Ревизија главног објекта. Према важећи законима и прописима инвеститор је дужан да ангажује независну ревизорску кућу ради провере главног пројекта.
12. Издавање грађевинске дозволе. За овај корак је задужена општина Жагубица која би на основу раније реализованих корака требало да донесе овакав акт.
13. Изградња мале хидроелектране. На основу главног пројекта и издате грађевинске дозволе врши се изградња мале хидроелектране "Рибаре". За овај корак инвеститор мора да ангажује извођача радова са искуством у изради оваквих пројеката. Ангажовани извођач радова ће бити одговоран за квалитет изграђеног објекта.
14. Израда пројекта изведеног стања. За овај корак инвеститор мора да ангажује пројектантску кућу са искуством у изради оваквих пројеката. Ангажована пројектантска кућа ће бити одговорна за квалитет урађеног пројекта.
15. Технички пријем објекта. За овај корак су задужени:
 - ❖ надлежни органи општине Жагубица који су издали грађевинску дозволу,
 - ❖ надлежно електродистрибутивно предузеће,
 - ❖ надлежно водопривредно предузеће.
16. Стицање статуса повлашћеног произвођача електричне енергије. На основу Уредбе о мерама подстицаја за производњу електричне енергије коришћењем обновљивих извора енергије и комбинованом производњом електричне и топлотне енергије (у даљем тексту Уредба), а у складу са чланом 3 ове Уредбе, мала хидроелектрана "Рибаре" може бити регистрована као повлашћени произвођач електричне енергије. Ову регистрацију врше надлежни државни органи, а на захтев инвеститора.
17. У уговору са надлежним електродистрибутивним предузећем о откупу произведене електричне енергије. Према члану 6. Уредбе, мала хидроелектрана "Рибаре" као повлашћени произвођач електричне енергије, потписује са надлежним електродистрибутивним предузећем (купцем) уговор о правима и обавезама у пословима трговине електричном енергијом. Сагласнос на овај уговор мора да да и Министарство за рударство и енергетику.

НАПОМЕНА: Предложени акциони план је дефинисао главне кораке у реализацији пројекта. Треба имати у виду да постоји низ међукорака које је тешко унапред дефинисати обзиром на непостојање јасне законске регулативе у овој области, као и обзиром на низак ниво искуства свих у ланцу одговорних за реализацију пројекта овог типа.



Шема 1 - Процедура реализације хидроелектране мале снаге, [58]

ЗАКЉУЧАК

Хидроелектране малих снага могу значајно допринети производњи електричне енергије. У Србији постоји јако пуно малих водотокова који су погодни за изградњу оваквих постројења те ће у будућности сигурно имати већи удео у укупној производњи електричне енергије. Конструкција и економичност је врло специфична за сваку локацију.

Прво поглавље рада се бави дефинисањем хидроелектране малих снага, под којом се подразумева постројење за претварање енергије водотокова у електричну енергију. Сматра се да мале хидроелектране немају штетан утицај на околину. Занимљива је чињеница да у свету не постоји јасна граница која дефинише категорију малих хидроелектрана. Међутим, у Европи се све више прихвата горња граница до 10MW и та се граница поштује и у Србији.

У другом поглављу детаљно су описане теоријске базе и начини извођења савремених хидроелектрана. Поред традиционалних инсталираних акумулационих, проточних и реверзибилних хидроелектрана, на копненим водотоковима: рекама, потоцима, каналима, све више су у примени хидроелектране на морским таласима, плинама и осекама. Рентабилно коришћење хидроенергије у Републици Србији се своди на изградњу малих акумулационих или проточних хидроелектрана.

Треће поглавље се бави основним деловима хидроелектрана које се могу изградити на нашем подручју. Неизоставан део сваке хидроелектране су грађевински делови, машинска и електро опрема чија конструкција зависи од типа хидроелектране, локалних услова и доступности грађевинског материјала. Тиме је отворено још једно поглавље тесно везано са темом рада, па је и ова тематика детаљно изложена са акцентом на проточне хидроелектране јер ће управо за овај тип бити рађен детаљан избор компоненти. Основни грађевински елементи оваквих хидроелектрана су: брана, захват, водостан, прелив, цевовод под притиском и машинска зграда која се своди на једну просторију са агрегатом и дизалицом одређене носивости. Под агрегатом се подразумева: одређен тип турбине: Франсисова, Капланова, Турго, Банки или цевна турбине; мултипликатор уколико турбина и генератор не раде са истим бројем обртаја; синхрони или асинхрони генератор; командни ормар и систем турбинске регулације чија је основна намена да обезбеде регулацију броја обртаја и снаге агрегата.

У четвртном поглављу дат је детаљан приказ изградње хидроелектране почевши од избора локације које се могу произвољно изабрати или на основу "Катастра малих хидроелектрана Србије". Овим катастром је одређено 856 потенцијалних локација за које су дати хидролошки подаци, подаци о могућој акумулацији, геолошки подаци и мапе локације. За потребе мастер рада изабрана је локација хидроелектране "Рибаре", на реци Млави, која се налази у насељу Изварица (Општина Жагубица). Пошто поменута локација није искоришћена, овде се указала веома изражена потреба за детаљним пројектовањем и избором компонената хидроелектране. На основу препоруке из Катастра усвојена је преливна брана ширине 16m и висине 3,5m. Акумулација која настаје подизањем нивоа воде не потапа насељени терен и обрадиво земљиште. Како би се заштитила популација рибе, предвиђена је изградња заобилазних

канала који ће омогућити рибама да заобиђу подручје хидроелектране. Расположиви максимални проток воде током кишног периода износи $6,44 \text{ m}^3/\text{s}$, док је просечан, узимајући у обзир и сушни период $4,29 \text{ m}^3/\text{s}$. Подизањем нивоа реке остварује се нето пад од $10,255 \text{ m}$. Вода се од таложнице на десној страни обале реке спроводи гравитационим армирано-бетонским цевоводом дужине 1550 m до водене коморе. Од водене коморе до машинске зграде, водоток се спроводи кроз челичну цев дужине 30 m . На основу препорука произвођача оваквих постројења, усвојена је вертикална Каплан турбина са двоструком регулацијом Руског произвођача "Силовые машины", снаге $570,129 \text{ kW}$. Воду из цевовода прихвата метална уводна комора која је спиралног облика и усмерава је на радно коло које је пречника 3200 mm и окреће се са $178,57 \text{ min}^{-1}$, а садржи 4 лопатице чији је попречни пресек аеропрофил $\text{NACA } 2412$. По излазу из радног кола, вода пролази кроз сифон, који представља излаз из турбинског постројења. За претварање механичке енергије у електричну усвојен је синхрони генератор снаге 550 kW са 500 min^{-1} па се за пренос снаге од турбине до генератора користи мултипликатор. У наставку је извршен избор турбинског вратила и детаљно описана машинска зграда.

У петом поглављу је посебна пажња посвећена анализи напонског стања турбинског вертикалног вратила. Упоредно је приказана аналитичка метода прорачуна уз примену одговарајућих претпоставки и нумеричка метода која обезбеђује знатно прецизнија и једноставнија решења. Детаљно је образложена неопходност развијања нове методологије у циљу повећања радног века и поузданости машинских система. Приликом анализе вратила нумеричком методом, добијени су резултати који показују да се променом радијуса код промене попречног пресека вратила може утицати на смањење концентracије напона. Посебно је разматран као пример радијус између испупченог дела вратила и прирубнице до радног кола.

У шестом поглављу приказани су оријентациони трошкови изградње хидроелектране и приходи које би постројење остваривало током експлоатације. Добијене вредности економске анализе показују да је пројекат врло добре економске исплативости, јер је време повратка уложених средстава од 8 година мање од века експлоатације пројекта које се предвиђа до 30 година.

Седмо поглавље се бави акционим планом реализације пројекта предложене хидроелектране мале снаге "Рибаре". Важно је напоменути да се поједини кораци у предложеном акционом плану делимично или у потпуности временски поклапају, те да је неопходно адекватно вођење пројекта како би се уклопио велики број различитих активности.

Пројектовањем једног оваквог постројења, изложеног у овом мастер раду, отвара једно потпуно ново поље за будуће конструисање малих хидроелектрана. Креиран је оригиналан мултидисциплинаран и веома свеобухватан приступ пројектовања веома комплексних постројења од којих се захтева висока поузданост. Показана је примена развијене методологије за одређену локацију. Презентован је потпуно нови приступ у одређивању напонско-деформационог стања машинских елемената изложених сложенем оптерећењу.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Институт Јарослав Черни - 1:100 О пројектовању ХЕ Ђердап, Интернет адреса: www.jcerni.org/index.php/en/activities/hydro-engineering-history/hydro-engineering-areas/hydropower/669-2013-03-05-16-50-12, приступљено 13.03.2017.
- [2] Википедија, Интернет адреса: www.sr.wikipedia.org/wiki/Дамотека:Под_градом.jpg, приступљено 13.03.2017.
- [3] Википедија, Интернет адреса: www.sr.wikipedia.org/wiki/Дамотека:Хидроелектрана_на_Ђетинји.jpg, приступљено 13.03.2017.
- [4] International Rivers, Интернет адреса: www.internationalrivers.org/campaigns/three-gorges-dam, приступљено 16.03.2017.
- [5] Википедија, Интернет адреса: www.en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_hydroelectric_power_stations, приступљено 16.03.2017.
- [6] ХЕ Ђердап, Интернет адреса: www.djerdap.rs/sr/page/33/HE+%C4%90erdap+1, , приступљено 16.03.2017.
- [7] Википедија, Интернет адреса: www.upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/ThreeGorgesDam-China2009.jpg, приступљено 16.03.2017.
- [8] ХЕ Ђердап, Интернет адреса: www.djerdap.rs/upload/Gallery/Images/2013_12/HE_erdap_1_Prelivna_polja_1.jpg, приступљено 16.02.2017.
- [9] Renewables Global Status Report 2016, REN21, Paris
- [10] Електро привреда Србије, Интернет адреса: www.eps.rs/Lat/Article.aspx?lista=Sitemap&id=86, приступљено 19.03.2017.
- [11] Ивановић, Д.: Хидроенергија, Подгорица, 2014.
- [12] Параграф, Интернет адреса: www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html, приступљено 20.03.2017.
- [13] Маричевић, С.: Одређивање основних компоненти за изградњу мале хидроелектране, Дипломски рад, Грађевински факултет, Осиек, 2017.
- [14] Чавар, М.: Могућност изградње реверзибилне хидроелектране на Перућком језеру, Завршни рад, Факултет стојарства и бродоградње, Загреб, 2015.
- [15] Лисица-Крпан, Д.: Енергија мора, Хемијско-технолошки факултет, Сплит, 2012.
- [16] Tidal Energy - Alternative Energy Tutorials, Интернет адреса: www.alternative-energy-tutorials.com/tidal-energy/tidal-energy.html, , приступљено 17.04.2017.
- [17] Alternative Energy Tutorials is Clean and Green Energy, Интернет адреса: www.alternative-energy-tutorials.com/images/stories/tidal/alt86.gif, приступљено 19.04.2017.

- [18] Хидро и геотермална енергија, Интернет адреса: www.green-group.rs/index.php?r=1765, приступљено 19.04.2017.
- [19] Нови свјетски поредак, Интернет адреса: www.novi-svjetski-poredak.com/wp-content/themes/cover-wp/images/go.png, приступљено 19.04.2017.
- [20] Wave Power Lab, Интернет адреса: www.wavepowerlab.weebly.com/uploads/3/1/5/2/31525653/1405072918.jpg, приступљено 19.04.2017.
- [21] Inhabitat, Design For a Better World!, Интернет адреса: <http://assets.inhabitat.com/files/aquabuoy.jpg>, приступљено 20.04.2017.
- [22] Гордић, Д.: Обновљиви извори енергије 2 - *МАЛЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ (скрипта)*, Факултет инжењерских наука универзитета у Крагујевцу, 2012.
- [23] ICOLD CIGB, Интернет адреса: www.icold-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp, приступљено 20.04.2017.
- [24] DocPlayer.cz, Интернет адреса: www.docplayer.cz/docs-images/55/36883175/images/22-0.jpg, приступљено 25.04.2017.
- [25] Small hydro power, Интернет адреса: www.hydrolink.cz/prilohy/12/Hermon-003.jpg, приступљено 25.04.2017.
- [26] Maxim-hydro, Интернет адреса: www.maxim-hydro.com/images/projects/owl1.jpg, приступљено 28.04.2017.
- [27] ESHA 2004, Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant
- [28] Renewables First: Renewable Energy in UK, Ireland & Africa, Интернет адреса: www.renewablesfirst.co.uk/wp-content/uploads/Stainless-steel-buckets-on-a-DIY-Turgo-turbine.jpg, приступљено 30.04.2017.
- [29] Energy Education, Интернет адреса: www.energyeducation.ca/wiki/images/thumb/8/8e/Ossberger_turbine_runner.jpg/360px-Ossberger_turbine_runner.jpg, приступљено 30.04.2017.
- [30] Small Hydro Turbine Gearboxes - Wikov, Интернет адреса: https://www.wikov.com/file/edee/prilohy/hydro_wikov_en_1504-20170119-104418.pdf, приступљено 22.05.2017.
- [31] Србија воде, Интернет адреса: www.srbijavode.rs/sr-latin/home/Aktuelno/mhe.html, приступљено 02.05.2017.
- [32] Енергопројект-Хидроинжењеринг, Катастар малих хидроелектрана у Републици Србији, Београд, 1991.

- [33] Jefferson Institute, Развој пројекта и израда пројектне документације за малу хидроцентралу "Рибаре", студија случаја
- [34] Јовановић, Б., Паровић, М.: Развој пројекта и израда пројектне документације за малу хидроцентралу "Рибаре", Jefferson Institute, 2010.
- [35] Прша, М., Ребрина, М., Средноселец, И.: Анализа геометријских карактеристика рибљих стаза у овисности о хидрауличким увјетима течења, Загреб, 2013.
- [36] Д.О.О. Бетоњерка Чачак, Интернет адреса: www.betonjerka-cacak.co.rs/cevi.htm приступљено 02.05.2017.
- [37] Силовые машины, Интернет адреса: www.power-m.ru/, приступљено 02.05.2017.
- [38] Васильев, Ю. С., Саморуков, И. С., Хлебников С. Н.: Основное энергетическое оборудование гидроэлектростанций, Санкт-Петербург, 2002.
- [39] Бенишек, М., Хидрауличне турбине, Машински факултет Универзитета у Београду, 1998.
- [40] Turbine & Alternateur: La société, Интернет адреса: www.turbinealternateur.fr/wp-content/uploads/2016/06/diam-1550.jpg/, приступљено 21.05.2017.
- [41] Васић, М.: Пројектовање ветрогенератора мале снаге, Дипломски рад, Висока техничка школа струковних студија Пожаревац, 2013.
- [42] Flaspöhler, T.: Design of the runner of a Kaplan turbine for small hydroelectric power plants, Tampere University of Applied Sciences, Mechanical engineering, 2007.
- [43] Airfoil Tools, Интернет адреса: www.airfoiltools.com/airfoil/naca4digit, , приступљено 03.06.2017.
- [44] Win Pa Pa Aye, Zaw Moe Htet, Htay Htay Win: Design and Velocity Distribution of Runner Blade for Axial Flow Turbine, International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 2012.
- [45] Гућ, Ј.: Распоред тлака на лопатице аксијалне турбине (Каплан), Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, 2013.
- [46] Hydro Energy, Интернет адреса: www.hydroenergy.pro/wp-content/uploads/2015/09/Kaplan-Turbine.png, приступљено 05.06.2017.
- [47] Kovalev, N. N.: *Hydroturbines, design and construction*, Moskva, 1961.
- [48] FAB 3R: Heavy Equipment Fabrication - Maintenance & Repair, Интернет адреса: www.fab3r.com/fichiers/photos/l_100_3333.jpg, приступљено 05.06.2017.

- [49] Zeco Hydropower, Интернет адреса: www.zeco.it/wp-content/uploads/2012/11/turbine-kaplan-05.jpg, приступљено 07.06.2017.
- [50] Like Liked Unlike Metal spiral case kaplan turbine for France, Интернет адреса: www.media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp_800_800/AAEAAQAAAAAAAAANsAAAAJDAwYjIyN2U5LTdhOGYtNDY5Yi05ODdiLTQ5NTc3MmUxYzRmNg.jpg, приступљено 07.06.2017.
- [51] Север Суботица, Интернет адреса: www.sever.rs/wp01/?page_id=78, приступљено 07.06.2017.
- [52] Север Суботица, Профактура 0686.
- [53] Wikow каталог, Стандард 2011.
- [54] Eisenbeiss hydro power catalog, Интернет адреса: https://www.eisenbeiss.at/wp-content/uploads/2016/12/31183_Eisenbeiss_Wasserkraft_E.pdf, приступљено 09.06.2017.
- [55] Момчиловић, Д.: Развој метода за повећање радног века и поузданости машинских система у условима замора, Докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, 2014.
- [56] Уредба о подстицајним мерама за производњу електричне енергије из обновљивих извора и из високоефикасне комбиноване производње електричне и топлотне енергије, Службени гласник РС, бр. 56/2016 од 15.6.2016. године, ступила је на снагу 16.6.2016, а важи до 31.12.2018.
- [57] Шкокљев, И.: Планирање електроенергетског система - проблеми, питања и одговори из одабраних области, Београд, 2000.
- [58] NVO Green Home i WWF, Кораци према одрживом развоју малих хидроелектрана у Црној Гори, 2015.

ПРИЛОГ

KATASTAR MALIH HIDROELEKTRANA

KATASTARSKI LIST

Broj 76

A	SIFRA: D.L.	HE	"RIBARE"
STANJE IZGRADNJE	1) u izgradnji — izgrađeno	Godina puštanja u pogon	2)
STANJE DOKUMENTACIJE	3) vodoprivredna osnova osnovni projekat studija idejno rešenje	idejni projekat investicioni projekat glavni projekat	
POREKLO DOKUMENTACIJE	4)		
OBRADIVAČ DOKUMENTACIJE	5)		

OPŠTI PODACI

LOKACIJA	6) UZVODNO OD RIBARA	OPŠTINA	7) ŽAGUBICA
koordinate pregrade	7) $x = 499822$ $y = 755472$	SLIV	8) DUNAVA
tip pregrade	8) BETONSKI PRAG	VODOTOK	9) MLAVA
tip postrojenja	12) pribransko kombinovano derivaciono		

HIDROLOŠKI PODACI

POVRŠINA SLIVA	13) $F_{sl} = 408,8$ km ²	GODIŠNJI DOTOX	14) $W_{god} = 135,21$ hm ³
PROSEČNE PADAVINE	14) $P_{sr} = 800$ mm	SPECIFIČNI OTICAJ	15) $10,5$ l/sec/km ²
PROSEČNI PROTICAJ	15) $Q_{sr} = 4,29$ m ³ /sec	EVAKUACIONA V.V.	16) $Q_{ev} = 550$ m ³ /sec

PODACI O AKUMULACIJI

NAZIV	19)	KOTE	NORM.	20)	m.n.m.
ZAPREMINA AKUMULACIJE	20) $V_{uk} =$ hm ³	USPORA	MIN.	24)	263,0 m.n.m.
$\beta_z = \frac{V_k}{W_{god}} \times 100$	21) $V_k =$ hm ³	KARAKTERISTIKE REGULISANJA		25)	dnevno sedmično sezonsko godišnje višegodišnje inverzno
KOMPENZACIONI BAZEN	22) $\beta_z =$ %				
	26) NEMA				

PODACI O DERIVACIJI

DOVODNO—ODVODNI ORGANI	27) Ukopan armirano-betonski dovod prečnika 2,5 m je dugačak 1550 m. čelični cevovod dužine 30,0 m je prečnika 1,6 m.
------------------------	---

ENERGETSKI PODACI

KOTA DONJE VODE	28) 252,0 m.n.m.	TIP TURBINE	34) CEVNA TURBINA
MAX BRUTO	29) $H_{mb} = 11,0$ m	BROJ AGREGATA	35) 2
NETO	30) $H_n = 10,0$ m	INSTALISANA SNAGA	36) $N_i = 495$ kW
SREDNJI NETO	31) $H_{sr,n} =$ m	PROIZVODNJA	37) $E_{god}^s = 1.860.000$ kWh
INSTALISANI PROTICAJ	32) $Q_i = 6,44$ m ³ /s	U NIZV. MHE	38) $E_{god}^n =$ kWh
Q_i/Q_{sr}	33) 1,5	UKUPNA	39) $E_{uk.god.} =$ kWh

EKONOMSKI PODACI GOD.

INVESTICIJE	UKUPNE	40) $I =$ 10 ⁶ din.	INVESTICIONI KOLIČNIK	42)	din/kWh
	SPECIFIČNE	41) $i =$ din/kW	PROSEČNA CENA ENERGIJE	43) $C_E =$	din/kWh

B**OSTALI PODACI**

- 44) Pregradno mesto se nalazi oko 1,1 km nizvodno od mosta u naselju Izvarica. Zahvat se sastoji od prelivnog betonskog praga visine oko 3,5 m sa taložnicom na desnoj obali odakle počinje armirano-betonski dovod dužine oko 1550 m do vodne komore. Odatle se nastavlja čelični cevovod dužine 30 m do mašinske zgrade locirane u naselju.

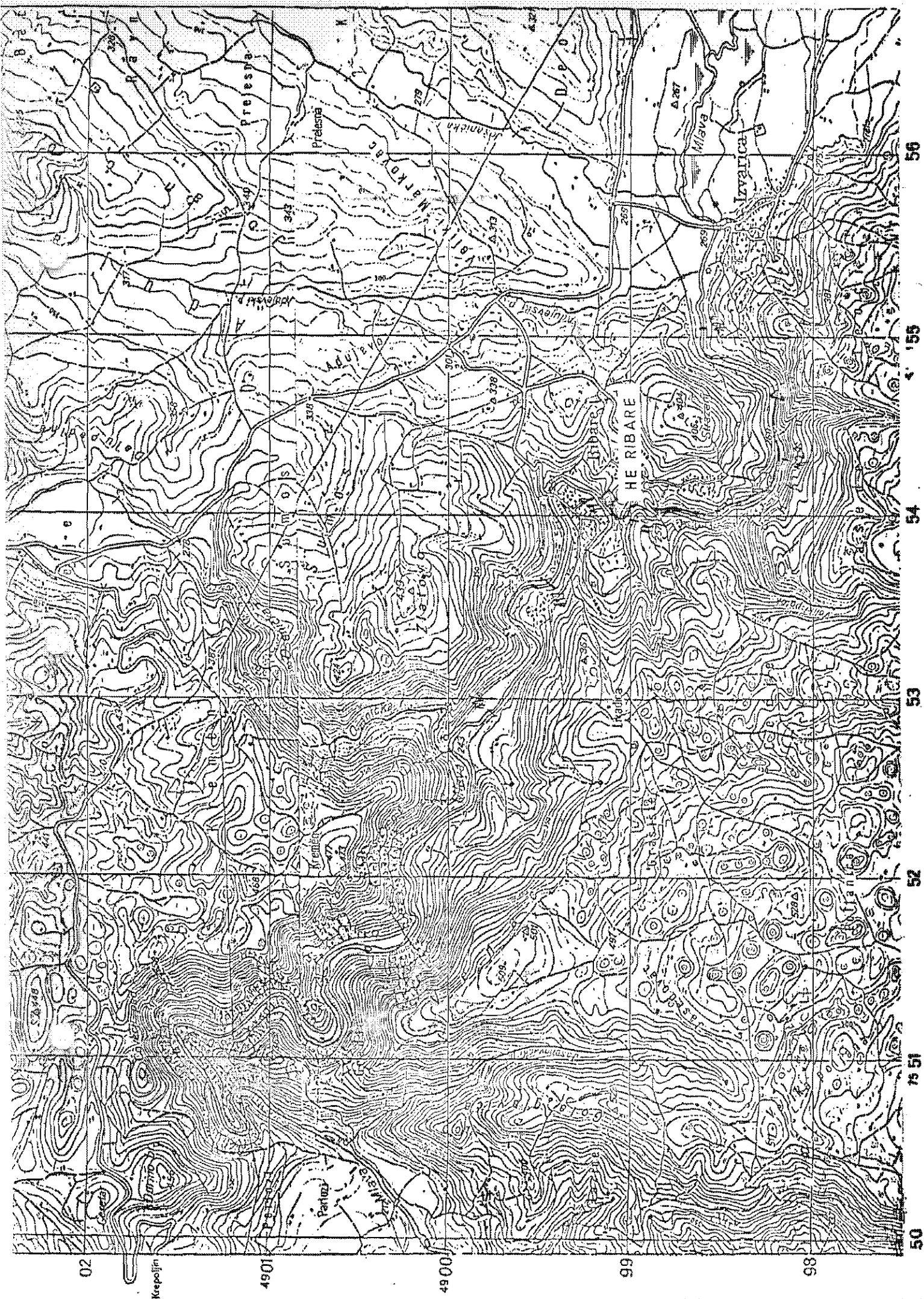
PODACI O INFRASTRUKTURI

- 45) Do pregradnog mesta treba rekonstruisati seoski put u dužini od 1,2 km do spoja sa asfaltnim putem. Hidroelektrana se može priključiti na distributivnu mrežu u naselju Ribare.

GEOLOŠKI PODACI

- 46) Na pregradnom mestu su svetlo sivi bankovići krečnjaci, donje kredne starosti na oba boka. Nagib padine levog boka je oko 45° - 50° . Padinska drobina je debljine oko 1-2m. Na desnom boku je seoski put širine 2,0 m i oko 4 m iznad reke, a napravljen je na rečnoj terasi širine oko 10,0 m i debljine oko 1,5 m. Rečnu terasu čini zaglinjena peskovito-šljunkovita drobina. Nagib padine iznad puta je oko 55° . Debljina padinske drobine je do 1 m. Vodotok je širok oko 16 m a dubine je do 1,5 m. Rečni nanos je debljine do 1,5 m. Sastav rečnog nanosa je: srednjozrni pesak, obluci šljunka veličine do 20 cm. U koritu reke ima i blokova stena veličine do 1 m.

- 1) SITUACIJA
- 2) PODOŽNI PROFIL



(m.n.m.)

300

290

280

270

260

250

240

230

220

210

200

HE, RIBARE

2630

L=15.5 km

252.0

HE, KREPOLJIN

2420

L=15 km

217.50

Stavba
v. 1/1
10.12.2020

(STACIONAŽA)

104

106

108

110

112

114

116

118

120

122

124

(km)

VODOTOK: R. MLAVA

PODUŽNI PROFIL SA PREDLOŽENIM REŠENJIMA

R=1: $\frac{100}{100000}$

Data Sheet 0686

Pror.-calcul. No: **0686**, Dimension drawing:
Main Generator (synchronous) and Accessories

- Marker's Name - proizvođač: "ATB - SEVER" - SUBOTICA, Serbia
- Motor/Generator type: - tip motora/generatora: **GSOTE 630 Lk-12**
- Power – prividna snaga 688 [kVA]
Rated output – aktivna snaga..... 550 (cos φ = 0.8 ind) [kW]
Rated current I_a - nominalna struja armature 993 [A]
Short-circuit current I_c / short-time – I_{KS} / kratkotrajno ≤ 2.5*I_a / ≤ 10 sec
Rated voltage (line) - linijski napon: 690 [V]
- Connection - veza namotaja: Y
- Rated speed / frequency - nazivni broj obrtaja / učestanost: 500 / 50 [min⁻¹] / [Hz]
- Runaway speed / action time – pobeg / vreme trajanja 1000 / 5 [min⁻¹] / max [min]
- 6a. Direction of rotation – smer obrtanja..... Right (view from DE side of generator)
7. Tables of Efficiency, Reactances and Times constants:

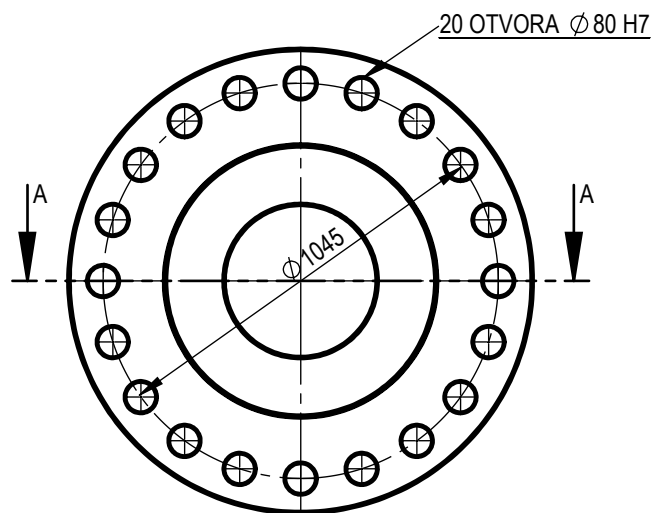
Power	25%	50%	75%	100%	125%
η (cos φ= 0.8 ind) [%]	92.80	94.90	95.30	95.20	94.90
η (cos φ=) [%]					
η (cos φ=1) [%]	94.60	96.40	96.75	96.70	96.50

Unsaturated % (rated kVA)	Reactances									Time constants [ms]				
	X _d	X _q	X' _d	X' _q	X'' _d	X'' _q	X ₂	X ₀	X _a	T' _f	T' _d	T'' _d	T'' _q	T _a
	119	56.6	22.1	56.6	15.6	13.1	14.3	6.6	8.3	1333	280	6.2	9.5	32.9
Saturated % (rated kVA): ind cap	X _{ds}	X _{qs}	X' _{ds}	X' _{qs}	X'' _{ds}	X'' _{qs}	X _{2s}	X _{0s}	X _{as}	T' _{fs}	T' _{ds}	T'' _{ds}	T'' _{qs}	T _{as}
	99.4	52.5	21.4	52.5	14.6	11.9	13.3	6.6	8.3	1243	274	5.1	8.4	30.4

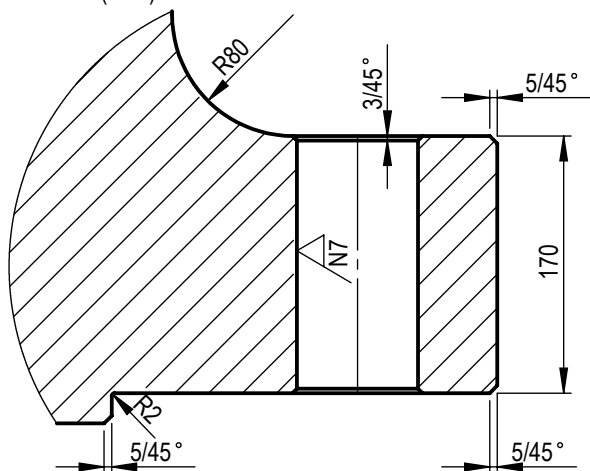
- Excitation system - pobuda rotora Brushless PS 700-73-12
Rated field current I_{fN} / I_f max – nom. struja pobude / max: .. 5.6 / I_fmax= 11 (≤ 10 sec) [A]
Rated field voltage U_{fN} / U_f max - U_N pob. / max Upob: 78 / U_fmax= 130 (≤ 10 sec) [V]
No load field current I_{f0} - I pobude praznog hoda: 2.7 [A]
No load field voltage U_{f0} - U pobude praznog hoda: 38 [V]
 - 8a.Regulation: BASLER - DECS 100 B15 + ICRM7 for protection
 - Mounting arrangement to IEC 34-7 - način prigradnje: IM 3011 (V1)
 - Protection: - Mehanička zaštita IP 23
- Terminal box - priključne kutije IP 55
 - Class of insulat. stator / overheat – kl. izol. stat./nadtemp... F / B (ΔΘ ≤ 80 K)
Class of insulat. rotor / overheat – kl. izol. rot./nadtemp..... H / B (ΔΘ ≤ 90 K)
- Ambient T / above sea level – T_{amb} / nadm H: -20 to +40 / up to 1200 [°C] / [m]
 - Material: - Stator casing- kućište statora: STEEL - WELDED
- Bearing: -DE - pogonska strana Accordance to Dimension drawing
NDE – str. supr. od pogonske: Accordance to Dimension drawing
 - Lubricant: - Podmazivanje: lithium grease (LGMT3)
- quantity - količina: - / - [g]
- method of cooling - način hlađenja: IC01
 - Severity of vibration - vrednost - veličina vibracija: IEC 60034-14 [mm/s]
 - Noise level at 1 meter - vrednost šuma na rastoj od 1 m: ... IEC 60034-9 [dB(A)]
 - Generator mass - masa generatora: 6800 [kg]
 - Motor moment of inertia J - moment inercije rotora J: 265 [kgm²]
 19. Thermal control of windings - termička zaštita namot.: (3 active + 3 reserve) x Pt100
 20. Thermal control of bearings - termička zaštita ležajeva 2 x Pt100
 21. Heaters of windings - grejači protiv kondenz. vlage: 2 x (3x99) [W], 230 [V], 1~50 [Hz]
 22. Timer of working hours - brojač radnih sati: No
 23. Speed sensor – induktivni davač impulsa, (broja obrtaja): .. Inductive sensor
 24. SPM nipples - indikator stanja ležajeva: No
 25. Painting cycle / finish - RAL 5010
 26. Motor for forced ventilation-prinudna ventilacija: No
 27. Additional forces Fr / Fa..... Accordance to Dimension drawing
 28. Shaft end driving side Accordance to Dimension drawing []
- Tests, specification and tolerances according to-protokoli, atesti i tolerancije saglasne: **IEC, VDE, DIN**
I/We certify to the correctness of the information given above for the offered machinery.
Potpisom su podaci overeni i validni!

$\phi 720\text{ g7}$	-0.024
	-0.104
$\phi 400\text{ H7}$	+ 0.057
	0
$\phi 80\text{ H7}$	+ 0.030
	0

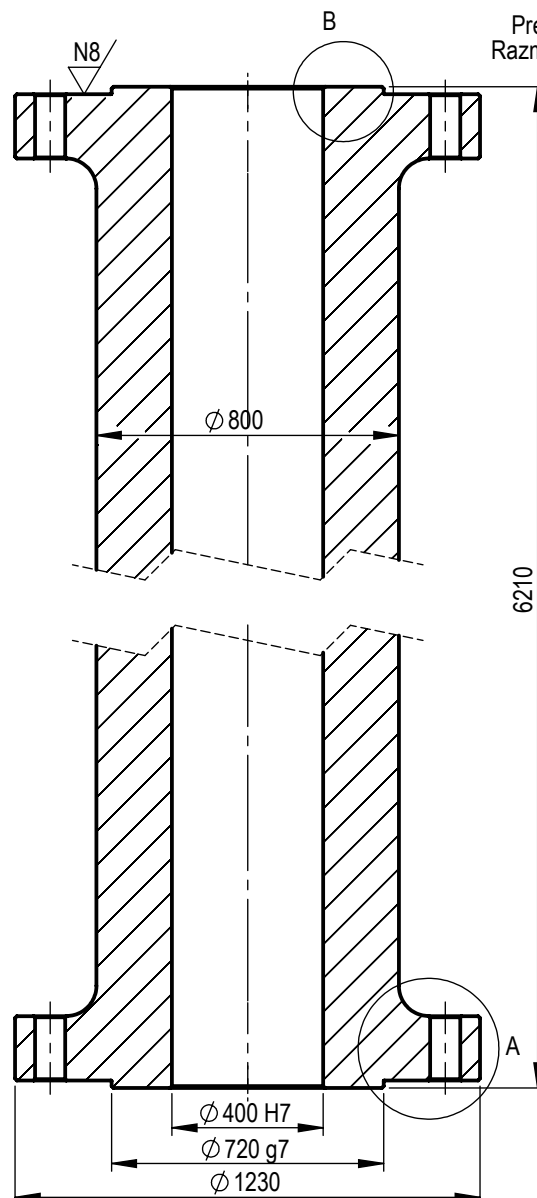
N7/ N8/



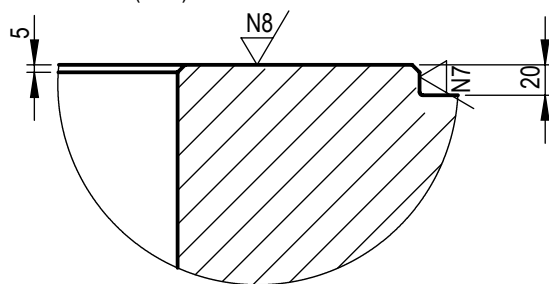
Detalj: A
Razmera: (1 : 5)



Presek: A-A
Razmera: (1 : 20)



Detalj: B
Razmera: (1 : 5)



							Masa: 19 983,302 Kg	Razmera:	
				Konstruisao	Ime i prezime Milan Vasić	Datum 03.07.2017.	Naziv VERTIKALNO TURBINSKO VRATILO	List: 1	
				Obradio				Format: A4	
				Crtao					
				Odobrio					
				FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU			Oznaka: V1.100.00		
St. i	Izmena	Datum	Ime				Izv. pod.	Zamena za	