

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Димитријевић М. Никола

**Студија могућности стављања у погон постојеће, односно
изградње нове, мале хидроелектране на Грошничком
језеру**

завршни рад

Крагујевац, 2013.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Хидрауличке и пнеуматске машине

Број индекса: 22/2008

Димитријевић М. Никола

**Студија могућности стављања у погон постојеће,
односно изградње нове, мале хидроелектране на
Грошничком језеру**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Др Милун Бабић - ментор**
- 2. Др Вања Шуштершич**
- 3. Др Слободан Савић**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да урадити студију могућности стављања у погон постојеће, односно изградње нове, мале хидроелектране на Грошничком језеру. Обрађени су могући утицаји на повећање енергетске ефикасности коришћења хидроенергије, као и економска оправданост изградње поменутог.

Препоручена литература:

[1] „ТУРБОМАШИНЕ – теорија и математичко моделирање“ Проф др. Милун Ј. Бабић, Проф. Др. Светислав Стојковић

[2] „МАЛЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ У ЕУРОПИ: приручник о потребним административним поступцима“ Проф. др. сц. Звонимир Гузовић

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine

Крагујевац, датум

18. 10. 2013. год.

ментор:

Др Милун Бабић

Резиме:

Предмет овог рада је утврђивање потенцијала за производњу електричне енергије на хидроакумулацији у Грошници код Крагујеваца у Србији, ради подизања енергетске ефикасности постројења ЈКП Водовод и канализација из Крагујевца.

У прибранском постројењу ове хидроакумулације је пре Другог светског рада изграђена мала хидроелектрана, која је ван функције око шездесет година, па је се показало неопходним испитати да ли се та мала хидроелектрана може ставити у функцију, посебно у условима када се из ове акумулације са веома смањеном количином воде снабдева само неколико оближњих приградских насеља.

Ако резултат анализе покаже да је реконструкција постојеће опреме у постојећој маллој хидроелектрани неисплатив и енергетски неефикасан, онда спровести анализу о градњи нове мале хидроелектране која ће радити са високим степеном корисаности и која ће подразумевати брзу отплату уложених средстава за градњу.

Кључне речи:

Хидротурбине, турбине, енергија, вода, брана, МХЕ Грошница, ...

Abstract:

The object of this study is to determine the potential for the generation of electricity at the hydro reservoir in Grosnica near Kragujevac, Serbia, in order to increase the energy efficiency of the JKP Vodovod facility from Kragujevac.

In the dam facility of the reservoir before the Second World War there was built a small hydroelectric power plant, which has been out of order for about sixty years , and it has been deemed necessary to examine whether the small hydro power plant can be put into operation , particularly in circumstances where from this accumulation, with a very reduced amount of water, supplies only a few nearby suburbs.

If tests show that the reconstruction of the existing equipment in the existing small hydroelectric power plant is unprofitable and inefficient energy wise, then conduct an analysis on the construction of new small hydro power plants that work with high degree of usefulness and that would bring a quick repayment of invested capital for construction.

Keywords:

Hydro-turbine, turbine, energy, water, dam, MHE Grosnica, ...

Садржај

1.0	Увод	7
1.1	Енергија	7
1.2	Бране [³].....	8
1.2.1	Типови брана [³]	11
1.3	Електрични генератори [⁴]	17
1.3.1	Историја развоја електричних генератора [⁴]	17
1.3.2	Врсте генератора наизменичне струје [⁴].....	19
1.4	Процес пречишћавања воде [5]	20
1.5	Хидротурбине [⁶].....	22
1.5.1	Историја развоја хидрауличних турбина [⁶]	22
1.5.2	Принцип рада и основни математички модели за симулацију размене енергије у хидрауличним турбинама [⁶].....	24
1.5.3	Напор радног кола са бесконачно много неизмерно танких лопатица - Ојлерова једначина за турбомашине [⁷].....	25
1.5.4	Енергијски губици при раду турбомашина [⁷].....	29
1.5.5	Снаге и степени корисности хидрауличних турбомашина [⁷]	34
2.0	Приказ хидроакумулације Водојажа	38
2.1	Технички опис хидропостројења Водојажа	39
2.1.1	Опште напомене о хидропостројењима	39
2.1.2	Осврт на техничке карактеристике хидроакумулације Водојажа и на пратећа хидропостројења	40
2.2	Посебан осврт на малу хидроелектрану у хидропостројењу Водојажа	46
2.2.1	Лучно-гравитациона брана.....	46
2.2.2	Филтерско постројење – брзо-пешчани филтер.....	46
2.2.3	Осврт на Francis-ове турбине које представљају основни структурни део мале хидроелектране Водојажа	48
2.3	Опис неопходних реконструкционо-репаративних послова које је потребно урадити да би мала хидроелектрана у хидропостројењу Водојажа била стављена у погон	49
3.0	Потребни документи за изградњу/репарацију и прикључивање малих хидроелектрана (МХЕ) на електродистрибутивну мрежу.....	50
3.1	Поступак изградње/репарације МХЕ.....	51
4.0	Посебне специфичности постојеће МХЕ на Водојажи	52

4.1 Кратке напомене о фирми "Voith" која је произвођач турбина уграђених у МХЕ на Водојажи, као потенцијалном испоручиоцу нове МХЕ за Водојажу	54
4.2 Дискусија о могућностима за репарацију постојеће МХЕ на Водојажи и оправданости таквог захвата	54
4.3 Дискусија о могућностима за изградњу нове МХЕ на Водојажи и оправданости таквог захвата	57
5.0 Прорачун енергетских параметара за изградњу нове МХЕ на Водојажи	58
5.1 Подаци о доводном цевоводу	58
5.2 Избор турбине на за МХЕ на Водојажи	61
5.3 Избор генератора МХЕ	62
5.4 Избор типа турбине	64
6.0 Економска анализа	67
6.1 Грађевински и хидрограђевински	67
6.2 Електро-машинска опрема	68
6.3 Рекапитулација	68
7.0 Закључак	70
8.0 Литература	71

1.0 Увод

У овом завршном раду описана је мала хидроелектрана која се налази у прибранском делу хидроакумулације „Грошница“, која је изграђена пре Другог светског рата са циљем да искористи хидроенергију воде којом је из те акумулације снабдеван Крагујевац. Произведена електрична енергија коришћена је за потребе електропостројења, међу којима се посебно истицало постројење за озонирање воде, али за расвету не само у прибранском делу, већ и оближњег села Грошница. Након Другог светског рата, мала хидроелектрана је заустављена, јер због ниске цене електричне енергије њено коришћење није било исплативо, и вода од тада, пре него што оде даље, протиче кроз заустављена турбинска кола.

С обзиром на чињеницу да ова мала хидроелектрана има и историјску важност, јер показује како су се некад крагујевчани брижно односили према коришћењу свих видова енергије, али и због тога што би у новим условима производња електричне енергије била исплатива, решио сам да размотрим могућности за њено поновно стављање у функцију. Зато је било неопходно спровести низ стручних анализа: од визуелне инспекције постројења, утврђивања садашњег техничко-технолошког „здравственог стања“ хидроелектране, техничко-технолошког анализирања конструкције и утврђивања техно-економског формата за стављање у погон ове мале хидроелектране.

На Сликама [2](#). И [20](#). приказана је брана „Водојажа“ на Грошничком језеру.

Да би овај рад имао све атрибуте завршног рада у његовом уводном делу најпре ћу изложити кратеке осврте на следеће појмове: енергија, брана, електрични генератор, пречишћавање воде и хидротурбине, који су од значаја за овај рад.

1.1 Енергија

Енергија је способност вршења рада. Ова општа дефиниција је једна од уобичајених дефиниција која се користи у хидроенергетици, и то у оном делу који треба да одговори на питање о узроку и пореклу природних феномена као што су: акција, дејство и сила.

Сваки физички систем поседује енергију у извесној количини. Количина енергије система није апсолутна вредност већ је релативна у односу на референтно стање или референтни ниво. Енергија физичког система се дефинише као количина механичког рада кога систем може да произведе када мења своје текуће стање и прелази у референтно стање (на пример ако се литар воде охлади до 0 °C, или када ауто удари дрво и успори од 120 km/h до 0 km/h).



Слика 1 Далеководи у Сјеници

У савременом свету непрекидно расте потрошња енергије, при чему потрошња електричне енергије расте брже од потрошње других облика енергије (Слика 1.), будући да је она веома погодна за коришћење, јер се може претворити у скоро сваки други облик енергије. Растућу потрошњу електричне енергије задовољава њена производња трансформацијом хидроенергије река и природних или вештачких хидроакumulација (хидроелектране), експанзијом паре или гаса произведених сагоревањем фосилних горива (термоелектране), или фисијом нуклеарног горива (нуклеарне електране). [¹]

Како је у структури извора електричне енергије у свету доминантно учешће термоелектрана на фосилна и друга горива, укупна ефикасност трансформације примарне енергије у електричну енергију је врло мала. При томе се путем расхладне воде у окружење или водени ток испушта отпадна топлота (45-60% од енергије садржане у гориву), а путем димних гасова у атмосферу честици и гасовити загађивачи (око 15% енергије садржане у гориву).

Електрична енергија је један од облика енергије који се производи дејством електромагнетског поља на наелектрисање. Поред ове, строго физичке, дефиниције постоји општеприхваћена конвенција да је електрична енергија (нестручне особе употребљавају и појмове електрична струја, струја и електрицитет) оно што се: производи у електранама, преноси далеководима и дистрибуира до потрошача, где се користи за рад кућних апарата, канцеларијске опреме, индустријских машина, и омогућава довољно енергије како за кућно тако и за комерцијално осветљење, грејање, кување и индустријске процесе. [²]

1.2 Бране [³]

Бране на хидроакумулацијама, које готово увек представљају саставни део хидропостројења које се гради ради коришћења хидроенергије, а сврха јој је да подигне првобитни ниво воде узводно од бране. Подизање се врши, како би се добио већи пад за искоришћавање водне снаге (тј. већа потенцијална хидроенергија) ради производње електричне енергије, али и да се повећа дубина воде у водотоку ради олакшавање пловности или за сакупљање већих количина воде ради снабдевања урбаних подручја питком и техничком водом, или за наводњавање пољопривредних усева, као и за

регулацију речних водотокова, . У планинским подручјима, бране се често граде и да би се осигурала њихова поточна корита и спречили одрони.

Брана је грађевина подигнута преко корита природног или уметно изграђеног водотока

Бране су, историјски гледано, према писаним подацима, коришћене за контролу нивоа воде река Тигар и Еуфрат у Месопотамији. Најранија позната брана је брана Јава у Јордану, 100 километара североисточно од главног града Амана. Ова *гравитациона* брана била је у облику каменог зида висине 9 метара и ширине 1 метар, а зид је био, подржан земљаним бедемом ширине 50 метар. Ова брана, према археолошким налазима датира из 3000 пне.

Древна египатска „Sadd-el-Kafara“ брана у „Wadi Al-Garawi“, које се налази око 25 км јужно од Каира, била је 102 метара дугачка у основи и 87 м широка. Она је изграђена око 2800. или 2600. пне као *диверзиона* брана за контролу поплава, али је уништена јаком кишом у току изградње, или убрзо после тога. Током 12-сте династије у 19. веку пне, (фараони Сеносерт трећи, Аменемхат



Слика 2 Брана „Водојажа“ на Грошничком језеру код Крагујевца (поглед из прве перспективе)

трећи и Аменмехат четврти) ископан је канал од 16 км који повезује „Fayum Depression“ и реку Нил у Средњем Египту. Две бране зване „Na-Uar“, рађене на правцу исток – запад, грађене су да задржавају воду током годишњих поплава, а затим би акумулисану воду испуштале у околне земље. Језеро звано „Mer-ver“, или језеро Моерис, покривало је 1700 квадратних километара, а данас је познато као Беркат Кароун.

Крајем 3. века пре нове ере, израђени су сложени системи за воду у Дхолавира (савремена Индија). Систем је имао 16 резервоара, бране и различите канале за прикупљање воде и њено чување.

Бране изграђене током римског царства карактерисала је "Римљанска способност планирања и организованог грађевинског инжењеринга". Римски планери увели су нови концепт великих акумулационих брана које би осигурале стално водоснабдевање за урбана насеља и у току сушних сезона. Ове бране су заптиване малтером и посебним римским бетоном, што је омогућавало да се граде веће бране него раније. Пример таквих брана су оне које су изграђене на језеру Хомс, која представља највећу вештачку брану изграђену до тада, и брана Харбака. Обе ове бране су се налазиле у римској Сирији. Највиша римска брана је брана Субиацио у близини Рима. Њена рекордна висина од 50 метара остала је непревазиђена до њеног случајног разарања у 1305-те године.

Римски инжењери су рутински користили разне до тада успостављене стандарде који су им омогућавали брзу израду *насипаних* и зиданих *гравитационих* брана, али су показали и висок степен иновативности, увођењем већине других основних брана, које су биле непознате до тада. Ово укључује *архи-гравитационе* бране, *лучне* бране, *потпорне* бране, као и више *лучно-потпорних* брана. Римљани су, такође, почели да бране граде и са могућношћу да буду коришћене као мостови (као што, рецимо, је мост од Валеријана у Ирану).

Ефлатун Пинар је брана Хетита и пролећни храм код Конија, у Турској. Сматра се да је изграђена у време царства Хетита између 15. и 13. века пре нове ере).

Каллани брана је изграђена од неотесаног камена. Дуга је преко 300 метара, висока 4,5 метра и широка 20 метара, а препречује главни ток реке Кавери у Тамил Наду у Јужној Индији. Њена структура датира из 2. века нове ере и сматра се једном од најстаријих водо-диверзионих или водо-регулационих структура у свету, а карактеристично је то што је и данас у употреби. Њена сврха је била да преусмерава ток воде од Кавери преко плодних Делта региона ради наводњавања.

Ду Ђијанг Иан је најстарији систем за наводњавање у Кини који укључује брану која контролише отицање воде. Завршена је у 251. пне. Велика *земљана* брана, направљена од стране премијера Чу, да би се спречиле поплаве реке Сунсху Ао, које је она правила у данашњој северној провинцији Анхуи. Ова брана је изазвала стварање огромног резервоара за наводњавање (100 км у обиму) и та акумулација постоји и данас.

У Ирану, мост бране као што су Банд-е Каисар се користи да обезбеди хидроенергију ради напајања водом подизних механизма. Једна од првих таквих брана у Ирану био је Римски мост-брана која је изграђена у Дезфулу, која је омогућавала покретање механизма да подигне воду 50 лаката у висину ради водоснабдевање свих кућа у граду. У тој земљи грађене су, такође, тзв. *диврезионе* бране. Оне су коришћене за покретање механизма за млевење житарица, а подаци кажу да су носиле назив Пул-и-Булаити. Прва оваква брана, заједно са пратећом опремом за млевење изграђена је на реци Карун, Поред Ирана, оваква постројења изграђена су и у многим другим деловима исламског света. У 10. веку, Ал-Мукаддаси описао је неколико оваквих брана и пратећих постројења која су изграђене у Персији. Он је известио да је једна у Ахваз-у дужа од 910 метара, и да покреће много водених дискова за подизање воде у аквадукте кроз које је вода текла према резервоарима у граду, као и то да је брана у Банд-и-Амир, коришћена је за наводњавање 300 села.

У Холандији „Низоземској“, бране се почеле најчешће да граде ради регулисања нивоа речних вода, или ради спречавања морске воде да потопи тло које се налазило испод нивоа мора. Такве бране су често означавале почетак града, јер се преко њих, као преко мостова, ступало у градски ареал. На пример холандски град Амстердам (стари назив Амстелредам) почиње од бране преко реке Амстел, изграђене крајем 12. века, а Ротердам почиње са браном преко реке Ротте - мање притоке Ниеуве Маас. Централни трг у Амстердаму, који се сада налази на локацији где је пре 800 година била изграђена стара брана и где је започињао град, носи назив Дам Сквер (Трг Бране), или једноставно Дам (Брана).

Напредовање у развоју технологија градње брана како по величини, тако и по мулти-функционисању почиње да се убрзава од тренутка када је француски инжењер Беноит Фоурнеирон развио прву успешну хидротурбину 1832-ге године, а ера градње великих савремених брана започела је са изградњом Хуверове брана на реци Колорадо у близини Лас Вегаса 1936-те године. До 1997-ме, изграђено је око 800.000 брана широм света, од којих су око 40.000 више од 15 метара.

1.2.1 Типови брана [3]

Бране се могу формирати посредством људског деловања, природних узрока, или чак интервенцијом дивљих животиња као што то чине даброви. Бране направљене од стране човека обично се класификују према величини (висини), намени или структури.

Бране могу бити *сталне*, *покретне* или *мешовите*.

Сталне бране су у непомицне масивне грађевине, којима се не може регулисати водостај узводно од бране, а вишак воде се прелива преко њихове круне. Бране могу бити насуте, од камена или армирано-бетонске. Ако се водостај не може регулисати, сталне бране се подижу већином само у горњем току планинских водотока или у дубоко усеченим коритима, где дизање водостаја код преливања великих вода не проузрокује штете на обалном подручју. Сталне се бране граде до висине од приближно 15 m; ако им је висина већа или ако затварају долину у брдовитом терену, зову се долирске преграде, а ако се граде од земљаног насипа, зову се успорним насипима. Бране до 15 m називају се ниским, а више од тога високим.

Покретне бране састоје се од покретних конструкција, устава, смештених међу стубовима. Дизањем или спуштањем устава отвара се протицајни пресек водотока. Тако се регулише протицање воде кроз брану, а тиме и водостај узводно од бране.

На основу структуре и материјала који се користи при градњи, бране се класификују као: *арч* (лук, лучне)-гравитационе бране, насипне бране и зидане бране, са неколико подтипова.

Лучне бране - Код лучних брана, стабилност се постиже комбинацијом лука и гравитационог деловања. Ако је узводно лице бране вертикално, цео терет бране који њен темељ прима је услед њене тежине, а расподела нормалног хидростатичког притиска у вертикалном и хоризонталном смеру зависиће од крутости бране у тим правцима. Када је

узводно лице нагнуто, дистрибуција је оптерећења је много комплекснија. За ову врсту брана, чврсти поуздани ослонци на потпорним зидовима (било да подупиру бочни зид или кањон) су од велике важности. Најпожељније место за градњу лучне бране је уски кањон са великим бочним зидовима који су састављени од звучне стеновитог материјала. Безбедност лучне бране зависи од снаге потпорних зидова у бочном зиду, тако да није важно да је лучна брана само добро уседиштена у бочне зидове, већ је веома важан и карактер стена од којих су оне направљене.

У употреби су два типа једно-лучних брана: тј. бране константног-угла и бране константног-радијуса. Бране константног-радијуса има исти радијус, што значи да како канал постаје ужи према дну бране, централни угао наспрам лица бране постаје мањи. Џонс Фаллс Брана ([Слика 3](#)), у Канади, је брана константног-радијуса. Бране константног-угла, познате су и као бране променљивог полупречника.

Бране са константним-радијусом бране су много ређе од брана са константним-углом.

На [Слици 4](#). Приказана је Паркер Брана која је типичан представник лучних брана са константним-углом.

Постоје и лучне бране са дупло-лучном изведбом, које су познате и као танко-љускасте бране. Вилдхорс Брана ([Слика 5](#)) поред Моунтаин Цити-ја, у Невади, у САД, пример је тог типа брана. За градњу оваквих брана потребна је мања количина бетона, али оне преносе велика оптерећења на подлогу и носаче. Њихов изглед сличан је једно-лучној брани, али са изразитим вертикалним кривинама на њој. [³]



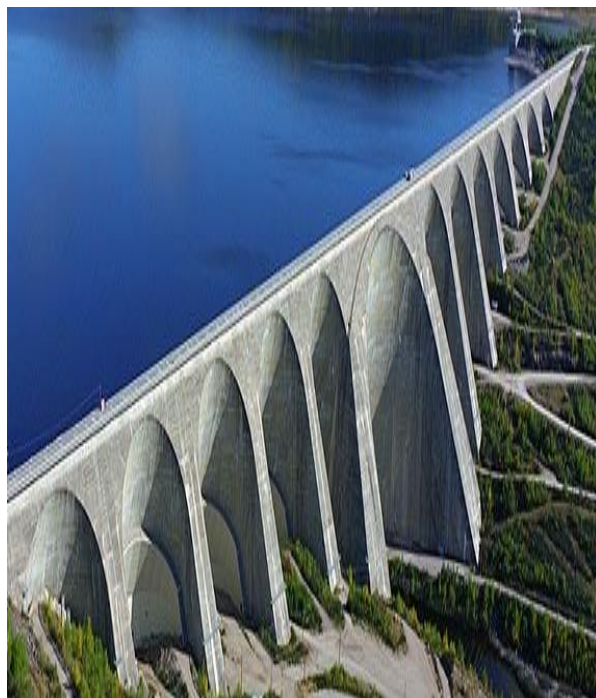
Слика 3 Џонс Фаллс Брана (*Jones Falls Dam*)



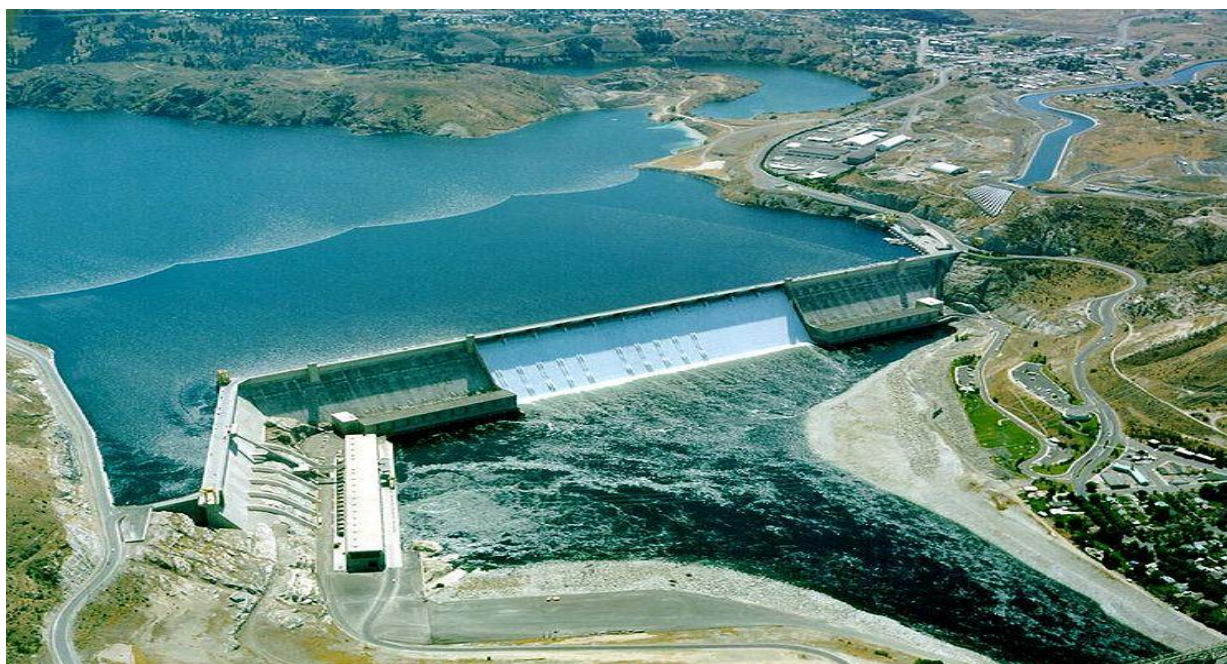
Слика 4 Паркер Брана (*Parker Dam*)



Слика 5 Вајлдхорс брана (Wildhorse Dam)



Слика 6 Данијел-Џонсонова брана



Слика 7 Брана Гранд Цоули (Grand Coulee Dam)

Више-лучна брана се састоји од више од једно-лучних брана са бетонским подупирачима као пропрату потпорних зидова, као на пример Данијел-Џонсонова брана (Слика 6), Квебек, Канада. Више-лучна брана не захтева много подупирача као оне

шупље-гравитационог типа, али захтева добру „камену“ подлогу, јер су трпе велика оптерећења. [3]

Гравитационе бране - Код гравитационих брана, сила која држи бране у месту против притиска воде је Земљина гравитација, која масу бране вуче доле. Вода бочно (низводно) притиска брану, тежећи да обори брану окрећући је око своје пете (тачка у доњем низводним делу бране). Тежина бране је спречава у томе, зато што сила тежине тежи да обрне брану на другу страну пете. Дизајнер обезбеђује да је брана довољно тешка, тако да тежина бране победи тај конкурс. У смислу инжењеринга, то је тачно кад резултанта сила гравитације која делује на брану и притисак воде бране делују у правцу линији која пролази узводно од пете бране. [3]

За ову врсту бране, неопходно је да има непропусну основу са великом снагом лежаја.

Када се налази на погодном месту, брана може доказати да буде боља алтернатива другим врстама брана. Када је изграђена на пажљиво проучаваним темељима, брана вероватно представља најбољи избор од других врста брана. Пошто је страх од поплаве снажан мотиватор у многим регионима, гравитационе бране се граде и у случајевима у где би изградња лучне бране био много економичнији избор. Гравитационе бране се класификују као " добре " или " шупље " и углавном су направљене од бетона или цигле. Чврста брана се више користи, иако је шупља брана често економичнија за изградњу. Брана Гранд Цоулее (Grand Coulee Dam, [Слика 7](#)) је чврста брана и „Braddock Locks & Dam“ ([Слика 8](#)) је шупље брана.



Слика 8 Braddock Locks & Dam

Лучно-гравитационе бране - Гравитациона брана може да се комбинује са лучном браном у лучно-гравитациону брану за подручја са великим протоцима воде, али са мање расположивог материјала за чисту гравитациону брану. Унутрашња компресија бране, од воде смањује бочну (хоризонталну) силу која делује на брану. Дакле, гравитациона сила бране је умањена, односно брана не мора да буде толико масивна. Ово омогућава тање бране и штеди ресурсе. Пример ове бране је „Hoover “ брана ([Слика 9](#)).

Бараж брана - То је посебна врста бране која се састоји од низа великих врата која се могу отворати или затварати да би се контролисала количина воде која пролази кроз брану. Капије су постављене бочно између стубова који су одговорни за подршку од

оптерећења воде, а често се користе и за контролу и стабилизацију протока воде за наводњавање (Слика 10). Бараж бране које се граде на ушћу река или у лагунама да спрече упаде плимских таласа, или да се користите плимска енергија за производњу електричне струје, познате су као плимске бараж бране. [3]



Слика 9 Hoover Dam



Слика 10 Koshi Barrage

Насип брана - То су бране од сабијене земље, а постоје два основна типа: са каменом попуном и са земљаном попуном бране. Насип брана користи своју тежину да задржи снагу воде, попут гравитацијске бране направљене од бетона (Слика 11).

Пошто бране преграђују водоток, оне представљају сметњу комуникацији екосистема узводно и низводно од бране. Због тога се њихове конструкције опремају посебним подконструкцијама које морају да обезбеде и при најекстремнијим сушама протицаје у низводне регије који су већи или једнаки тзв. Еколошким протицајима, али да омогуће узводно-низводно-узводну комуникацију риба и осталих бића која настањују речне токове (тзв. **Рибље стазе**). [3]



Слика 11 Gathright Dam

1.3 Електрични генератори [4]

У производњи електричне енергије, електрични генератор је уређај који претвара механичку енергију у електричну енергију. Генератор приморава електричну струју да тече кроз спољашње коло. Извор механичке енергије може бити клипни мотор или турбина.

Генератори пружају скоро сву снагу за електро-енергетске мреже.

Обрнута конверзија електричне у механичку енергију врши електрични мотор, а мотори и генератори имају много сличности. Многи мотори могу бити механички погон за производњу електричне енергије, а често се могу користити и као генератори. [4]

1.3.1 Историја развоја електричних генератора [4]

Пре него што је веза између магнетизма и електрицитета откривена, коришћени су електростатички генератори, који су функционисали сагласно принципима електростатике. Такви генератори су генерисали веома висок напон и слабу струју. Радили су користећи кретање наелектрисаних појасева, плоча и дискова који су носили електрична пуњења до електрода високог потенцијала. Пуњења су генерисана уз помоћ једног од следећа два механизма:

- механизам електростатичке индукције и
- механизам трибо-електричног ("[triboelectric](#)") ефекта.

Због своје неефикасности и врло високих напона које су генерисали, електростатички генератори су радили у режимима мале снаге, тако да никада нису коришћени за производњу комерцијално значајних количина електричне енергије. [Вимсхурст](#) машина и [Ван де Граф](#) генератор су примери ових машина које су "преживеле" све до данашњих дана.

У 1827. години, Мађар [Аниос Једлик](#) почео је да експериментише са ротирајућим електромагнетним уређајима, које је назвао електромагнетни само-ротори, сада су познати као Једликове динаме. У прототипима једно-полних електричних стартера (завршених између 1852 и 1854.) и стационарни и обртни делови били су електромагнети. Он је формулисао је концепт динаме најмање 6 година пре [Сиенс-а](#) и [Вхитстон-а \(Wheatstone\)](#), али га није патентирао јер је мислио да он није био први који је то остварио. У суштини, концепт се састоји у томе што уместо сталних магнета, два електромагнета индукују магнетно поље око ротора. То је, такође, било и откриће принципа самопобуде.

У периоду 1831-1832., [Мајкл Фарадеј](#) открио је принцип рада електромагнетних генератора, касније названим - [Фарадејев закон](#), који каже да се електромоторна сила се генерише у електричном проводнику који окружује различити магнетни флуks. Он је, такође, изградио први електромагнетни генератор - [Фарадејев диск](#), једно-поларни тип генератора, користећи диск од бакра који ротира између полова магнета потковице. Тако је генерисао мали једносмерни напон.

Ова конструкција била је неефикасна, због самопоништавања струја супротних токова у регионима који нису били под утицајем магнетног поља. Док је струја била директно индукована испод магнета, струја би циркулисала уназад, у регионима који су били изван утицаја магнетног поља. Овакви супротни токови ограничавали су излазну снагу на "pickup" жице и појачавали су загревање бакарних дискова. Касније, код једнополних генератора, овај проблем ће се решити коришћењем низа магнета распоређених по ободу диска да би се одржавао стабилан ефекат поља у једном смеру протока струје.

Још једна мана им је била због тога што је излазни напон је био веома низак, због једне тренутне стазе кроз магнетни флуks. Истраживачи су утврдили да се наизменичним коришћењем више обртаја жице на калему може произвести више кориснијих напона. Пошто је излазни напон пропорционалан броју обртаја, генератори су се могли лако пројектовати тако да произведу било који жељени напон варирањем број обртаја. Намотаји жице су постали основна карактеристика свих каснијих конструкција генератора.

Динамо је први електрични генератор који је могао да пренесе снагу за индустрију. Динамо користи електромагнетну индукцију за претварање механичке ротације у једносмерну струју кроз коришћење комутатора. Први динамо генератор је направио Хиполут Пикси ([Hippolyte Pixii](#)), 1832-ге године. [⁴]

Динамо машина се састоји од непокретног објекта, који обезбеђује константно магнетно поље, и комплета ротирајућих намотаја који се крећу у тој области. На малим машинама константно магнетно поље се може обезбедити са једним или више сталних магнета; веће машине имају константно магнетно поље које ствара један или више електромагнета, који се обично називају поља калемова.

Кроз низ случајних открића, динамо је постао извор многих каснијих проналазака, укључујући и једносмерни електромотор, наизменични алтернатор, наизменични синхрони мотор, и ротациони претварач.

Производња наизменичних струја започета је након откривања магнетне индукције електричне струје. Прве машине које су могле производити наизменичне струје развили су Мајкл Фарадеј и Хиполите Пикси.

Фарадеј је пројектовао тзв. "ротирајући правоугаоник", чији је рад био хетеро-поларан - сваки активни проводник је пролазио редом кроз регионе где је магнетно поље супротних праваца. Прва јавна демонстрација робуснијег "система алтернатора" одржана је у 1886. Велики двофазни генератор наизменичне струје изградио је британски електричар, [J.E.X. Гордон](#), 1882. [Лорд Келвин](#) и [Себастијан Феранти](#) су, такође, пројектовали ране врсте алтернатора, који су производили фреквенције између 100 и 300 Hz. Године 1891-ве, [Никола Тесла](#) је патентирао "високо фреквентни" алтернатор (око 15 kHz). Након 1891., уведени су полифазни алтернатори за снабдевање струје више различитих фаза. Касније, алтернатори су пројектовани за различите наизменичне струје фреквенције између 16 и око 100 Hz, за потребу осветљења и погона електричних мотора.

Велики динамо генератори за генерисање енергије се сада ретко виђају, због скоро универзалне примене наизменичне струје за дистрибуцију електричне енергије. Пре усвајања наизменичне струје, веома велики директно-струјни динамо генератори су били

једино средство производње и дистрибуције електричне енергије. Наизменична струја је почела да доминира, због својства наизменичне струје да се лако трансформише и да при веома високим напонима обезбеђује мале губитке на великим раздаљине. [4]

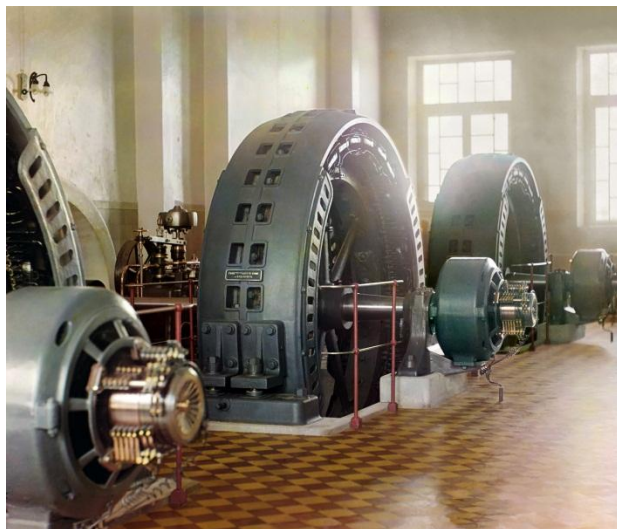
1.3.2 Врсте генератора наизменичне струје [4]

Данас је у употреби велики спектар генератора, како по електричној снази коју генеришу, тако и по намени. У наредном тексту биће изнет осврт на неколико основних врста генератора.

Динамо - Динамо је електрични генератор који производи једносмерну струју (DC) са употребом комутатора. Динамо генератори су први електрични генератори који су способни за производњу снага потребних индустрији, и они представљају темељ на коме су се многе друге касније електронске трафо-направе надовезивале, укључујући и електромотор, наизменично (AC) алтернатор и ротациони претварач. Динамо има недостатке механичких комутатора. Такође, претварање AC у DC струју помоћу уређаја за напајање није баш ефикасно и економично.

Алтернатор - Без комутатора, динамо генератор постаје алтернатор. Алтернатори производе наизменичну струју са фреквенцијом која је синхрона са бројем окретаја ротора и у складу са бројем магнетних полова.

Аутомобилски алтернатори производе различите струје различитих фреквенција које се мењају са брзином мотора, које се затим конвертују преко исправљача у једносмерне.



Слика 12 Алтернатор направљен у Будимпешти, Мађарска

Неки уређаји, као што су сијалице са ужареним влакном и баластно-гоњене Флуоресцентне сијалице не захтевају константну фреквенцију, али синхрони мотори захтевају сталну мрежну фреквенцију. На Слици 12 приказан је овај тип генератора.

Када се прикључи на већу електроенергетску мрежу са другим алтернаторима, алтернатор ће динамички интерактовати са фреквенцијом већ присутном на мрежи, а радиће брзином која одговара мрежној фреквенцију. Ако покретачка снага није примењена, алтернатор ће, у сваком случају, наставити да се окреће константном брзином, вођен као синхрони мотор од стране мрежне

фреквенције. Алтернатор обично треба да се убрза до потребне брзине и усклађивања фаза пре повезивања на мрежу, пошто свака неусклађеност фреквенције изазва рад алтернатора као синхроног мотора.

Индукциони генератор - Индукциони генератор, или асинхрони генератор, је врста наизменичног електричног генератора који користи принципе асинхроних мотора за производњу енергије. Индукциони генератори раде тако што, механички, окрећу ротор брже од синхроне брзине, дајући негативно клизање. Регуларни наизменични асинхрони мотор обично може да се користи као генератор, без икаквих унутрашњих модификација. Индукциони генератори су корисни за апликације попут мини хидроелектрана, ветрогенератора, или при смањивању високог притиска гасних токова на нижи притисак.

При пуштању у рад индукциони генератор мора бити побуђен са водећим напоном, а то се обично постиже прикључењем на електричну мрежу, а понекад и помоћу самопобуде помоћу кондензатора за исправљање фаза.

МХД генератори – Магнето хидродинамички генератор директно «извлачи» струју из покретних врелих гасова кроз магнетно поље, без употребе ротирајуће електромагнетне машине. МХД генератори су првобитно развијени зато што је излаз плазма МХД генератора пламен, и могућности за загревање котлова за термоелектране. Први практичан дизајн је "AVCO Mk. 25", развијен 1965-те године. Америчка влада финансирао значајан развој, што је, 1987. године резултирало израдом једног 25 MW демонстрационог постројења. [4]

1.4 Процес пречишћавања воде [5]

Пречишћавање воде је процес уклањања нежељених хемикалија, биолошких загађивача, суспендованих честица и гасова из контаминиране воде. Циљ је да се произведе одговарајућа вода за одређену намену. Већина воде се пречишћава за људску исхрану (вода за пиће), али пречишћавање воде може бити дизајнирано и за разне друге сврхе, укључујући и испуњавања услова за медицинске, фарматолошке, хемијске и индустријске апликације. Генерални методи укључују физичке процесе као што су: филтрирање, седиментација и дестилација; биолошки процеси попут: спорих пешчаних филтера или биолошки активним угљем; хемијских процеса: као што флокулацију и хлоринацијом; и коришћење електромагнетног зрачења као што је: ултраљубичасто светло.

Пречишћавања воде може смањити концентрацију честица укључујући: суспендованих честица, паразита, бактерија, алги, гљивица, вируса; као и низ растворених честица и материјала добијених од површине воде, са којима је вода направила контакт после пада киша .

Стандарди за квалитет воде за пиће обично поставља влада или су то међународни стандарди. Ови стандарди обично постављају минималне и максималне концентрације загађености воде.

Није могуће рећи да ли је вода одговарајућег квалитета визуелним прегледом . Једноставне процедуре као што су кување или употребе *активних угљених филтера* у домаћинствима, нису довољни за лечење свих могућих загађивача који могу бити присутни у води из непознатог изворау. Чак и природна изворска вода - сматрала се безбедном за све практичне сврхе у 19-ом веку, сада се мора тестирати пре него што се

утврди да ли је вода исправана за пиће и ако није, какве терапије воде су потребне. Хемијске и микробиолошке анализа, иако скупе, једини су начин да се добију информације неопходне за доношење одлуке о одговарајућем начину пречишћавања воде.

Према извештају из 2007-ме од стране Светске здравствене организације (СЗО), 1,1 милијарди људи нема приступ побољшаном снабдевању питком водом, а 88% од 4 милијарде, оболи од дијареје годишње, које је приписано несигурној води и канализацији и неадекватној хигијени; и 1,8 милиона људи умиру од дијареје сваке године. СЗО процењује да је 94% случајева дијареје може се спречити кроз модификације животне средине, укључујући и приступ безбедној води. Једноставне технике за "лечење" воду, у свом дому, као што су хлорисање, филтери и соларна дезинфекција, и чување у сигурним "контејнерима", може спасити велики број живота сваке године. Смањење смртности од болести воде је главни циљ јавног здравља у развијеним земљама. [5]

Начини:

- Предтретман воде;
- Корекцију рН вредности;
- Коагулација и флокулација;
- Седиментација;
- Уклањање и складиштење муља;
- "Floc blanket clarifiers";
- Флотација раствореним ваздухом;
- Филтрација;
- Брзи пешчани филтери;
- Спори пешчани филтери;
- Мембранска филтрација;
- Уклањање јона и других растворених супстанци;
- Дезинфекција хлором;
- Дезинфекција хлор-диоксидам;
- Дезинфекција хлорамином;
- Озонска дезинфекција;
- Дезинфекција ултраљубичастим зрацима;
- Разне портабл методе дезинфекције;
- Соларна дезинфекција воде.

Додатне опције „лечења“:

- Флуорисање воде;
- Климатизација воде;
- Смањењем "плумбосолвенце";
- Уклањањем радијума;
- Уклањањем флуорида. [5]

1.5 Хидротурбине [6]

Хидротурбина је ротациона машина која узима енергију из кретања воде. Хидротурбине су развијене у 19. веку и биле су у широкој употреби за индустријску снагу пре електричних мрежа. Сада се углавном користе за производњу електричне енергије.

1.5.1 Историја развоја хидрауличних турбина[6]

У оквиру овог одељка укратко ћемо се осврнути на историјски развој хидрауличних турбина.

Воденички точкови се користе већ хиљадама година за производњу снаге за потребе индустрије. Њихов главни недостатак је величина, која ограничава проток и напор који може бити искоришћен. Развојна «миграција» од водених точкова до модерних турбина трајала је више стотина година. Развој се убрзао током индустријске револуције, употребом научних принципа и метода. А примена нових конструкционих материјала и производних метода допринели су повећању њихове радне поузданости, смањивању тежине и повећању специфичне снаге.

Реч турбина је увео француски инжењер Клод Бурдин почетком 19-ог века и она је везана за латински назив који означава "вртложење" или "вртлог". Главна разлика између раних водених турбина и водених точкова је вртложна компонента воде која прослеђује енергију окретања ротору. Ова додатна компонента кретања дозвољавала је турбини да буде мања од воденог точка исте снаге. Она је могла да «обради» више воде бржим окретањем радног кола, и да искористи далеко веће напоре.

Најранија позната хидротурбина била је произведена у време Римског царства. Две спирално-турбинске конструкције, готово идентичног дизајна, пронађене су на Чемтау-у и Тестоур-у ([Chemtou](#) и [Testour](#)) у данашњем Тунису, и датирају још из краја 3-ег и почетка 4-тог века нове ере.

[Јан Андреј Сегнер](#) развио реактивну хидротурбину ([Сегнер-ов точак](#)) средином 18-ог века. Ова турбина је имала хоризонталну осу обртања радног кола и била је претеча модерних хидротурбина. То је, у ствари, један веома једноставан уређај који се данас још увек производи за употребу у малим хидроелектранама. Интересантно је да је Сегнер радио са [Ојлер-ом](#) на неким од раних математичких теорија дизајна турбине.

У 18-ом веку, др Баркер измислио је сличну реакцијску хидрауличну турбину која је постала популарна за демонстрације у учионицама (lecture-hall). Једини познати преживели пример ове врсте турбина који се користио у производњи електричне енергије, датира из 1851-ве, налази се на Хациенди Буена Виста у Понцеу ([Hacienda Buena Vista, Ponce](#)), Порторико.

Године 1820-те, [Жан-Виктор Понцелет](#) развио је турбину «унутрашњег тока».

Године 1826-те, [Беноа Фоурнејрон](#) је развио турбину спољашњег тока. То је била ефикасна машина (степен корисности око 80%) која је слала воду кроз ротор са

једнодимензионало закривљеним лопатицама. Стационарни излаз је, такође, имао закривљене ивице. [6]

Године 1844-те, [Урија А. Бојден](#) развио је турбину спољашњег тока која је имала побољшања у односу на Фоурнејронове турбине. Њен облик ротора био је сличан као код Францисове турбине.

У 1849-ој, [Џејмс Б. Францис](#) побољшао је степен корисности реакцијске турбине на преко 90%. Он је, такође, спровео софистициране тестове и развио инжењерске методе за пројектовање ове нове врсте хидротурбина. [Францисова](#) турбина, названа по њему, је прва модерна хидротурбина. Она је и сада најчешће коришћена хидротурбина у свету. Францисова турбина обухвата, такође, и реакцијске турбине радијалног протока.

Хидротурбине унутрашњег тока имају веће степене корисности. Приликом проласка воде кроз овакву турбину стално се убрзава, и при том преноси енергију на ротор (радно коло), при чему се притисак воде полако опада до приближно атмосферске вредности, или у неким случајевима, на до притиска који је мањи од атмосферског.

Око 1913-те, [Виктор Каплан](#) пројектовао је нову врсту реакцијских турбина које су по њему добиле име - [Капланове](#) турбине. Њихово радно коло је пропелерног типа, а лопатице му се могу у току рада програмирано синхроно закретати око сопствених оса ради одржавања степена корисности што већим у што већем броју могућих радних режима. То је била велика еволуција Францисових турбина, али и револуција способности да се развију турбине које могу радити са великим и променљивим протоцима и са малим напорима.

Године 1866-те, Калифорнијски градитељ млинова Самјуел Кнајт је изумео машину која је довела импулсни систем на нови ниво. Инспириран млазним системима високог притиска коришћеним у хидрауличним рударству, у златним пољима, Кнајт је развио кашика-точак који је «заробљавао» енергију слободног млаза који је истицао из млазника под дејством веома великих напора. Ово је била тзв. зове импулсна/акциона, или тангенцијална турбина. Брзина млаза код њих је била, отприлике дупло већа од брзине «кашика» на периферији.

Године 1879-те, [Лестер Пелтон](#) (1829-1908.), док је експериментисао са Кнајт-Воланом, развио је тзв. „[двоструке кашике](#)“, уместо једноструких – Кнајтових, које су знатно побољшале степен корисности турбине и допринеле квалитету рада импулсних/акционих турбина. Око 1895-те, Вилијам Дабле побољшао је Пелтонову полуцилиндричну кашику на тај начин што ју је заменио са елиптичном кашиком са прорезом на врху да би се омогућило тзв. продужено дејство млаза истовременим контактом млаза са три суседне лопатице. Модерне Пелтонове турбине данас омогућавају постизање степена корисности који су већи од 92%.

[Турго](#) турбине и турбине „[укрштеног тока](#)“ су даље развојне варијанте, али оне нису нашле широку примену у електроенергетици као што је то случај са Пелтоновим, Францисовим и Каплановим турбинама. [6]

1.5.2 Принцип рада и основни математички модели за симулацију размене енергије у хидрауличним турбинама [6]

У оквиру овог одељка биће укратко приказан принцип дејства хидрауличних турбина и дата ревија математичких израза уз чију помоћ се може симулирати рад ових машина. Основа овог одељка базирана је на литератури [6].

Сагласно уобичајеној класификацији овде ће бити изнето по неколико напомена о реакцијским и тзв. импулсним (акцијским) турбинама.

1.5.2.1 Реакцијске хидротурбине [6]

Приликом проласка воде кроз проточни тракт хидрауличних турбина њена кинетичка енергије се релативно мало мења, али се зато знатно мења притисна енергија у флуиду.

Ракцијске турбине имају високе степене корисности када раде на средњим падовима и са релативно великим протоцима, па се углавном, користе на таквим теренима и водотоцима.

Већина хидротурбина, које су у употреби, су реакцијске турбине, и користе се у малим (<30 [m] / 98 [ft]) и средњим ($30 \div 300$ [m] / $98 \div 984$ [ft]) апликација главе (висина). Код реакцијских турбина, пад притиска се јавља и код фиксираних и код покретних лопатица.

У ову врсту хидротурбина спадају:

- Францисове хидротурбине,
- Капланове хидротурбине,
- Тајсонове хидротурбине,
- Горлове спиралне хидротурбине.

1.5.2.2 Импулсне (акцијске) хидротурбине [6]

Ову врсту турбина карактерише чињеница да се приликом проласка воде кроз њихове проточне органе притисна енергија готово не мења, али се мења кинетичка енергија флуида.

Импулсне (акцијске) турбине имају високе степене корисности када раде на великим падовима и са релативно малим протоцима, па се углавном, користе на таквим теренима и водотоцима.

У ову врсту се убрајају следеће хидротурбине:

- Воденични точак (Waterwheel).
- Пелтонова турбина.
- Турго турбина.

- Турбина [укрштеног тока](#).
- [Јонвалова](#) турбина.
- [Супротносмерно-преливни воденични точак](#) (Reverse overshot water-wheel).
- Турбина Архимедов завртањ ([Archimedes' screw](#)).
- „Barkh“ турбине.

Хидротурбине се, генерално, сматрају чистим произвођачима енергије, јер не изазивају прљају водоток.

У наставку овог текста биће приказано како се, полазећи од појма турбомашине са бесконачно много неизмерно танких лопатица, долази до математичког израза који је у литератури познат као Ојлерова једначина, а који омогућује да се израчуна напор хидрауличне турбине, која је предмет овог рада. [6]

1.5.3 Напор радног кола са бесконачно много неизмерно танких лопатица - Ојлерова једначина за турбомашине [7]

Ако кроз радно коло турбомашине протиче радни флуид са масеним протоком $\dot{m}_k$, онда ће кроз једну његову профилну решетку протицати елементарни масени проток $d\dot{m}_k$. Ово због тога што се свако радно коло турбомашине може саставити од бесконачно много одговарајућих профилних решетки ([Слика 13](#)). [7]

Кроз један међупрофилни канал профилне решетки која припада радном колу са бесконачно много неизмерно танких лопатица протицаће неизмерно мали део масеног протока $d(d\dot{m}_k)$ од укупног дела масеног протока $d\dot{m}_k$ који протиче кроз ту профилну решетку. [7]

Због промене правца и интензитета брзине радног флуида, која се остварује од улаза до излаза из радног простора фиктивног радног кола турбомашине са бесконачно много неизмерно танких лопатица, при потоку $\dot{m}_k$ мењаће се његова количина кретања, односно момент количине кретања, за вредност:

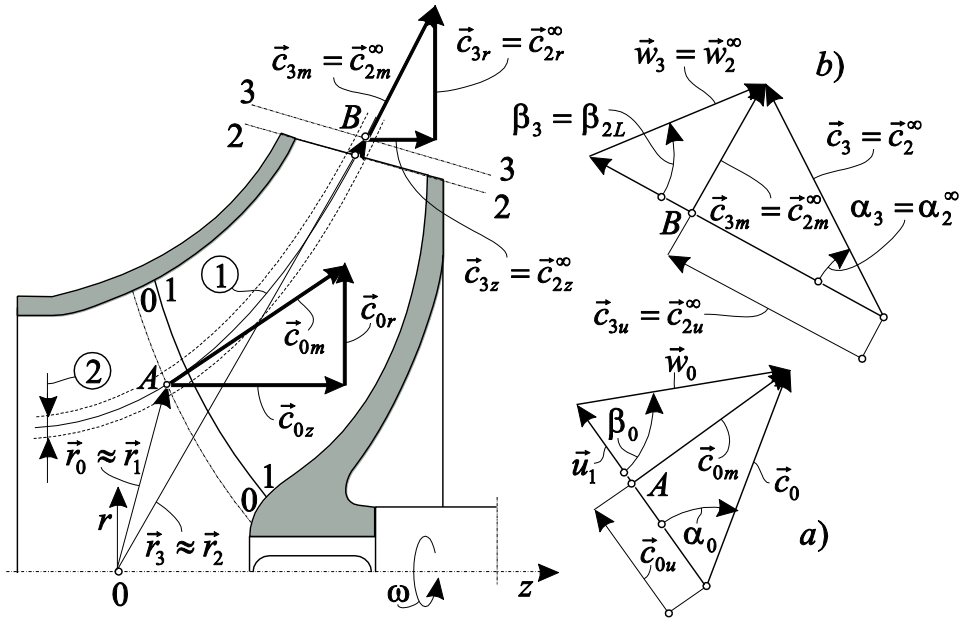
$$\pm \vec{M}^0 = \vec{M}_3^0 - \vec{M}_0^0, \quad (1)$$

где је:

$\vec{M}^0$ - активни момент који дејствује на радно коло ([Слика 13](#)), изазван променом момента количине кретања радног флуида (масеног протока $\dot{m}_k$) при проласку кроз његов радни простор,

$\vec{M}_0^0$ - момент количине кретања радног флуида на улазу у радни простор радног кола, срачунат у односу на тачку 0 ([Слика 13](#)),

$\vec{M}_3^0$ - момент количине кретања радног флуида на излазу из радног простора радног кола рачунат у односу на тачку 0 ([Слика 13](#)).



Слика 13. Меридијански пресек радног простора фиктивног полуаксијалног радног кола нетурбине са бесконачно много неизмерно танких лопатица

1- произвољно изабрана меридијанска струјница, 2 - неизмерно мала дебљина профилне решетке којој припада меридијанска струјница,

а - троугао брзина на улазу у радни простор радног кола, б- троугао брзина на излазу из радног простора радног кола

Пошто кроз једну, произвољно изабрану, профилну решетку (Слика 13) протиче $d\dot{m}_k$ радног флуида, онда ће она са моментом $d\vec{M}^0$ учествовати у укупно оствареном моменту радног кола. Из сличног разлога ће један од бесконачно много неизмерно уских међупрофилних канала који припада профилној решетки учествовати у укупном моменту $\vec{M}^0$ фиктивног радног кола са бесконачно много неизмерно танких лопатица са вредношћу $d(d\vec{M}^0)$. Сагласно изразу (1), вредност момента $d(d\vec{M}^0)$ може се изразити једначином:

$$\pm d(d\vec{M}^0) = d(d\vec{M}_3^0) - d(d\vec{M}_0^0), \quad (2)$$

где су, према Слици 13:

$$\pm d(d\vec{M}_0^0) = [\vec{r}_0, \vec{c}_0] \cdot d(d\dot{m}_k), \quad (3)$$

$$\pm d(d\vec{M}_3^0) = d(d\vec{M}_2^0) = [\vec{r}_2, \vec{c}_2^\infty] \cdot d(d\dot{m}_k), \quad (4)$$

моменти количине кретања инфинитезималне масе радног флуида која протиче кроз међупрофилни канал профилне решетке фиктивног радног кола са бесконачно много неизмерно танких лопатица. [7]

Имајући у виду релације (3), (4) и [Слика 13.](#), израз за "активни" момент (2), којим један неизмерно уски међупрофилни канал профилне решетке учествује у укупном моменту фиктивног радног кола, може се написати у облику:

$$\pm d(d\vec{M}^0) = [\vec{r}_2, \vec{c}_2^\infty] - [\vec{r}_1, \vec{c}_0] \cdot d(\dot{m}_k). \quad (5)$$

За устаљено струјање, какво се претпоставља да се формира у радном колу, вредности које фигуришу на десној страни израза (5) биће константне током времена, па ће и "активни" момент којим неизмерно уски канал профилне решетке фиктивног радног кола учествује у укупном моменту бити сталан током времена. ^[7]

Замењујући $\vec{c}_0$ и $\vec{c}_2^\infty$ са збиром њихових компоненти ([Слика 13](#)):

$$\begin{aligned} \vec{c}_0 &= \vec{c}_{0r} + \vec{c}_{0u} + \vec{c}_{0z} = c_{0r} \cdot \vec{r}_0 + c_{0u} \cdot \vec{\theta}_0 + c_{0z} \cdot \vec{z}_0, \\ \vec{c}_2^\infty &= \vec{c}_{2r}^\infty + \vec{c}_{2u}^\infty + \vec{c}_{2z}^\infty = c_{2r}^\infty \cdot \vec{r}_0 + c_{2u}^\infty \cdot \vec{\theta}_0 + c_{2z}^\infty \cdot \vec{z}_0, \end{aligned} \quad (6)$$

у израз (5), он се трансформише због $[\vec{r}, \vec{c}_r] = 0$, у:

$$\pm d(d\vec{M}^0) = d(\dot{m}_k) \cdot \{(r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}) \cdot \vec{z}_0 + (r_2 \cdot c_{2z}^\infty - r_1 \cdot c_{0z}) \cdot \vec{\theta}_0\}, \quad (7)$$

где су $\vec{\theta}_0$ и $\vec{z}_0$ - јединични вектори координатног система $0, r, \theta, z$, чија се оса z поклапа са осом обртања радног кола.

Увођењем ознака:

$$\pm d(dM_z^0) = d(\dot{m}_k) \cdot (r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}), \quad (8)$$

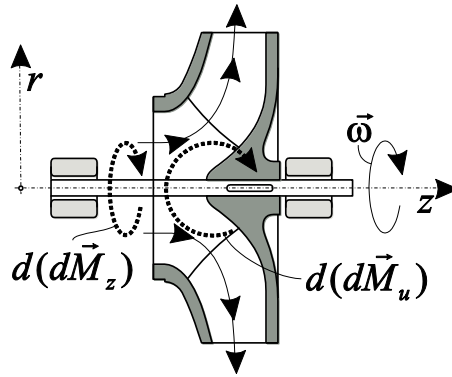
$$\pm d(dM_u^0) = d(\dot{m}_k) \cdot (r_2 \cdot c_{2z}^\infty - r_1 \cdot c_{0z}), \quad (9)$$

види се да се укупни резултујући момент којим струја радног флуида која протиче кроз један међупрофилни канал профилне решетке фиктивног радног кола делује на то радно коло може, за случај полуаксијалног кола, свести на следећи збир:

$$\pm d(d\vec{M}^0) = d(d\vec{M}_u^0) + d(d\vec{M}_z^0), \quad (10)$$

у коме компонента $d(d\vec{M}_z^0)$ делује у обимском правцу, тј. тежи да окрене радно коло око осе симетрије, а компонента $d(d\vec{M}_u^0)$ делује у меридијанској равни радног кола и тежи да осу кола помери у меридијанској равни ([Слика 14](#)).

Према томе, компонента момента (8), због сталности свога дејства, тежиће да окреће радно коло и врши користан рад (турбине), или ће се супротстављати окретању радног кола (нетурбине), а компонента момента (9) оптерећиваће лежајеве вратила радног кола (због увек у пракси присутне асиметрије кола) и неће вршити никакав користан рад. ^[7]



Сл. 14. Дејство момената $d(dM_z^0)$ и $d(dM_u^0)$

Аксијална компонента момента $d(dM_z^0)$ постојаће увек када постоји разлика обимских компоненти апсолутне брзине при уласку и изласку радног флуида из радног простора радног кола, а обимска компонента $d(dM_u^0)$ постојаће само онда када постоји компонента брзине c_z (аксијална и полуаксијална кола). [7]

Израз (8) важи и за турбине и за нетурбине, с тим што када се примењује на турбине испред момента треба писати знак $\leftarrow$, тј.:

$$\pm d(dM_z^0) = d(\dot{m}_k) \cdot (r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}), \quad (11)$$

а важи за струјање, како стишљивог, тако и нестишљивог радног флуида. У случају да је лопатични проточни орган непокретан момент $d(dM_z^0)$ оптерећивао би лопатице у обимском правцу.

Ако се једначина (11) помножи са угаоном брзином окретања радног кола ω коју узрокује збир свих момената у сваком од бесконачно много неизмерно уских међупрофилних канала на свакој од бесконачно много могућих осносиметричних струјних површи, код турбина, или угаоном брзином којом се обрће радно коло код нетурбина, добија се снага која се размењује дуж једне струјнице:

$$\pm d(dP_k) = \pm d(dM_z^0) \cdot \omega = d(\dot{m}_k) \cdot (r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}) \cdot \omega,$$

која, када се сведе на јединицу масеног протока радног флуида, представља стварни рад (напор), који би се разменио дуж једне струјнице у међулопатичном каналу фиктивног радног кола са бесконачно много неизмерно танких лопатица:

$$\pm Y_{th\infty} = \frac{\pm d(dP_k)}{d(\dot{m}_k)} = \omega \cdot (r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}), \quad (12)$$

односно тзв. Ојлерову једначину за турбомашине [7]:

$$\pm Y_{th\infty} = u_2 \cdot c_{2u}^\infty - u_1 \cdot c_{0u}. \quad (13)$$

Ако би се разматрао рад који размени јединица масе радног флуида у једној профилној решетки фиктивног радног кола са бесконачно много неизмерно танких

лопатица на једној осносиметричној струјној површи, онда се мора поћи од укупног обртног момента који би се разменио, у тој профилној решетки:

$$\pm dM_z^0 = \pm \int_0^{2\pi} d(dM_z^0).$$

После извршеног интеграљења, имајући у виду израз (11), добија се да учешће једне профилне решетки у укупном обртном моменту фиктивног радног кола износи:

$$\pm dM_z^0 = d\dot{m}_k \cdot (r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}), \quad (14)$$

и да је стварни рад који се размени у тој профилној решетки:

$$\pm Y_{th\infty} = \frac{\pm dP_k}{d\dot{m}_k} = \omega \cdot (r_2 \cdot c_{2u}^\infty - r_1 \cdot c_{0u}) = u_2 \cdot c_{2u}^\infty - u_1 \cdot c_{0u}, \quad (15)$$

идентичан стварном раду који се размени у тој профилној решетки дуж само једне струјнице (у једном неизмерно уском међупрофилном каналу). [7]

Из једначина (13) и (15) јасно се види да ће се дуж сваке меридијанске струјнице, односно на свакој могућој осносиметричној струјној површи, размењивати, у принципу, за исто c_{0u} и c_{2u}^∞ различит стварни рад, јер се r_1 и r_2 , односно u_1 и u_2 мењају од једне до друге просторне профилне решетки.

Ојлерова једначина омогућава одређивање теориског напора турбине, а кад се узме у обзир реалност радног кола (оно има коначан број дебелих лопатица) и заносење струје флуида на изласку из радног кола, тај напор се може дефинисати изразом [7]:

$$Y_{th} = \varepsilon \cdot Y_{th\infty}. \quad (16)$$

где је:

ε - (степен умањења напора радног кола (степен заносења струје на излазу из радног кола), који се одређује експерименталним путем, и за чије одређивање има низ проверених препорука [7],

Y_{th} - напор радног кола турбине са коначним бројем лопатица [7].

1.5.4 Енергијски губици при раду турбомашина [7]

Због рада дисипативних сила, тј. енергијских губитака који се јављају у току рада турбина, не може се целокупна расположива струјна енергија радног флуида претворити у технички (механички) рад. Сви ти енергијски губици дешавају се истовремено, али их је, због лакшег проучавања, погодније посебно разматрати. У том смислу, при раду сваке турбине разликују се следеће врсте губитака: хидраулички, волуметријски, губици услед трења диска и механички губици.

1.5.4.1 Хидраулички губици [7]

Хидраулички губици дешавају се дуж целог пута радног флуида кроз проточне канале турбине, тј. у усмерним (спроводним) проточним и радним органима турбине, а последица су трења које се јавља у самом радном флуиду и трења између радног флуида и зидова проточних канала.

Укупни хидраулички губици у турбини могу се класификовати према месту настанка на губитке у претколу, радном колу, заколу и спирали, односно на губитке у радном колу и усмерним (спроводним) проточним органима, тј.:

$$\Delta Y_H = \Delta Y_{Hk} + \Delta Y_{Hu} . \quad (17)$$

Хидраулички губици у усмерним проточним органима могу се проучавати на исти начин као и одговарајући губици у радном колу, замењујући релативну брзину $\vec{w}$ апсолутном брзином $\vec{c}$, па ће хидрауличким губицима у радном колу бити посвећено даље излагање.

Крећући се од улазног пресека 0—0 кроз један међулопатични канал радног кола дуж средње релативне струјнице до излазног пресека 3—3, струји радног флуида, посредством радних органа, доводи се (нетурбина), или одводи (турбина), стварни рад (напор) кола Y_{th} . При том се један део доведеног рада (нетурбина), или расположиве струјне енергије радног флуида (турбина), троши, због рада дисипативних сила, на савлађивање губитака, претварајући се у топлоту. Стационарно кретање елементарне масе радног флуида дуж те струјнице може се описати следећом енергијском једначином [7]:

$$i_0 + \frac{c_0^2}{2} \pm (\pm Y_{th}) = i_3 + \frac{c_3^2}{2} + \Delta Y_{Hk} , \quad (18)$$

из које се, имајући у виду једначину (13), може добити [7]:

$$i_0 + \frac{c_0^2}{2} \pm \frac{1}{2} (u_2 \cdot c_{3u} - u_1 \cdot c_{0u}) = i_3 + \frac{c_3^2}{2} + \Delta Y_{Hk} ,$$

или, после сређивања, имајући у виду relације (7.53 до 7.55):

$$i_0 + \frac{w_0^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} = i_3 + \frac{w_3^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} + \Delta Y_{Hk} , \quad (19)$$

која је у литератури позната као енергијска једначина за ротирајуће канале. Специфични хидраулички губици (губици енергије по јединици масе радног флуида) у целокупном радном колу једнаки су хидрауличким губицима у само једном његовом међулопатичном каналу.

Хидрауличке губитке у радном колу ΔY_{Hk} могуће је поделити на хидрауличке губитке услед трења у међулопатичним каналима ΔY_{Hkt} и ударне губитке ΔY_{Hku} , тј. :

$$\Delta Y_{Hk} = \Delta Y_{Hkt} + \Delta Y_{Hku} . \quad (20)$$

Хидрауличке губитке услед трења у радном колу могуће је, за случај хидрауличног (једнодимензијског) третмана струјања кроз радно коло, изразити на следећи начин:

$$\Delta Y_{Hkt} = \lambda_r \cdot \frac{L_k}{4R_{hk sr}} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} , \quad (21)$$

где је:

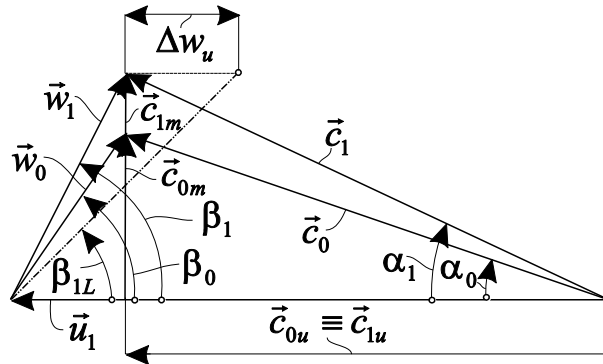
λ_r - коефицијент трења (нешто је већи од одговарајуће вредности у непокретним органима),

L_k - дужина међулопатичног канала дуж средње релативне струјнице,

$R_{hk sr}$ - средњи хидраулички радијус проточног канала,

w_{sr} - средња релативна брзина радног флуида у међу-лопатичном проточном каналу радног кола. [7]

Ударни хидраулички губици се јављају на улазу у лопатични систем радног кола, а најмањи су када му струја радног флуида прилази кинематички безударно, тј. када су правци улазних релативних брзина сагласни са правцима тангенти на почетке скелетница профила лопатица радног кола. Када би лопатице радног кола биле неизмерно танке, онда приликом кинематички безударног уласка радног флуида у радно коло не би било ударних хидрауличких губитака.



Слика 15. Улазни троугао брзина за случај кинематички ударног уласка радног флуида у радно коло турбине

Сматра се да је носилац ових губитака обимска компонента разлике релативних брзина на улазу Δw_u (Слика 15) и ови хидраулички губици могу се изразити као [7]:

$$\Delta Y_{Hku} = \xi \cdot \frac{\Delta w_u^2}{2} , \quad (22)$$

где је:

$$\xi = (0.5 \div 0.7) ,$$

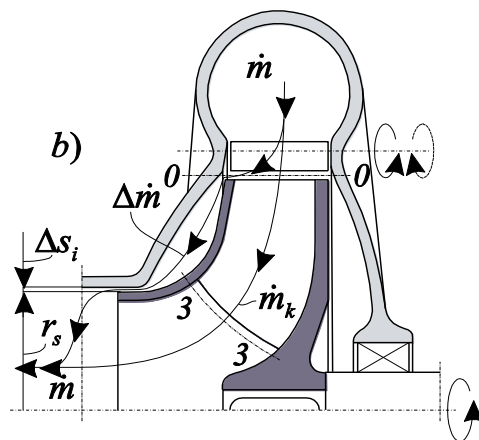
коэффициент ударных губитака.

Утрошак снаге на покривање хидрауличких губитака у турбини износи (Слика 15):

$$P_{\Delta Y_H} = \dot{m} \cdot \Delta Y_{Hk} + \dot{m} \cdot \Delta Y_{Hu} . \quad (23)$$

1.5.4.2 Волуметријски губици [7]

Да би радно коло могло да се окреће потребно је да између радног кола и кућишта постоје зазори. Кроз ове зазоре умиче одређени масени проток радног флуида који са собом односи расположиву струјну енергију (Слика 16).



Слика 16. Приказ волуметријских губитака турбине

Код нетурбина, због тога што је притисак на излазу радног кола већи него на улазу у радно коло масени проток радног флуида [7] :

$$\Delta \dot{m} = \rho \cdot \mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot \Delta s_i \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta Y_i} , \quad (24)$$

враћа се кроз зазоре између радног кола и кућишта на улаз у радно коло, где се придружује основном протоку $\dot{m}$, тако да кроз радно коло нетурбине стално протиче масени проток кола:

$$\dot{m}_k = \dot{m} + \Delta \dot{m} . \quad (25)$$

У изразу (8.8) величине на десној страни имају следећа значења [7]:

ρ [g/m³] - средња густина радног флуида,

$\mu = 0.2 \div 0.6$ - коефицијент протицања, чија величина зависи од типа заптивања зазора (мање вредности се односе на лабиринтно заптивање, а веће на заптивање помоћу прстена),

r_s [m] - спољашњи полупречник улазног отвора радног кола,

$\Delta s_i = 0.12 \div 0.5 \cdot 10^{-3}$ [m] - радијални зазор на месту заптивања.

Пад напора ΔY_i [kg] који се јавља у изразу (24) израчунава се уз помоћ следеће релације:

$$\Delta Y_i = \frac{p_3 - p_0}{\rho} - \frac{\omega^2}{8} \cdot (r_2^2 - r_s^2) . \quad (26)$$

Напомиње се да су при пројектовању турбина уобичајени следећи односи између полупречника r_s и зазора Δs_i :

- за $r_s \leq 50$ [mm], зазор се креће у границама

$$\Delta s_i = 0.15 \div 0.2 \text{ [mm]}, \text{ а}$$

- за $r_s > 50$ [mm] зазор се креће у границама

$$\Delta s_i = 0.2 + 0.001 \cdot r_s - 100 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} .$$

Протоку $\Delta \dot{m}$, код нетурбина, бива стално довођен стварни јединични рад кола Y_{th} , што изазива некористан утршак дела доведене снаге.

Због тога што је притисак на улазу у радно коло већи од притиска на излазу кола, део масеног протока $\Delta \dot{m}$ стално умиче кроз зазоре између кола и кућишта (Слика 16) и са собом неповратно односи неискоришћени рад Y . Услед тога је масени проток кроз радно коло турбине мањи од основног протока и износи:

$$\dot{m}_k = \dot{m} - \Delta \dot{m} . \quad (27)$$

Масени проток који умиче кроз зазоре између радног кола и кућишта турбине може се рачунати по обрасцу (24), једино вредност ΔY_i треба заменити релацијом [7]:

$$\Delta Y_i = \frac{p_0 - p_3}{\rho} - \frac{\omega^2}{8} \cdot (r_1^2 - r_s^2) . \quad (28)$$

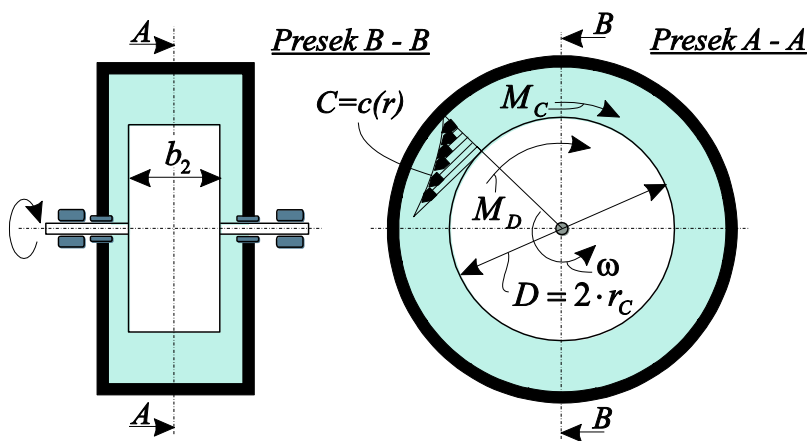
Утршак снаге на покривање волуметријских губитака у турбини износи:

$$P_{\Delta \dot{m}} = \Delta \dot{m} \cdot Y_{th} . \quad (29)$$

1.5.4.3 Губици услед трења радног флуида о спољашње површине радног кола (губици услед трења диска) [7]

Зазори између радног кола и кућишта турбине (Слика 16) стално су испуњени радним флуидом, тако да у зазорима између спољашњих површина радног кола, кућишта и радног флуида постоји стално вискозно трење, које односи део ΔY_R од доведеног техничког рада Y_i (нетурбине), односно од расположивог стварног напора кола Y_{th} (турбине).

При одређивању утроща снаге на покривање губитака у турбини услед трења радног флуида о спољашње површине радног кола, радно коло је могуће замислити као диск који се обрће угаоном брзином ω у простору испуњеном радним флуидом као што је то приказано на Сlici 17.



Слика 17 Упрошћени модел турбине за одређивање губитака услед трења о спољашње површине кола

Утрощак снаге на трење радног флуида о спољашње површине радног кола и кућишта састоји се од утроща због трења бочних површина диска кола, и од утроща због трења цилиндричне површине на пречнику D_2 о радни флуид:

$$P_R = 2 \cdot P_D + P_C = \dot{m}_k \cdot \Delta Y_R . \quad (30)$$

1.5.5 Снаге и степени корисности хидрауличних турбомашина [7]

Снага P [W] коју развија турбина при окретању радног кола може се изразити као производ момента M [Nm] који се остварује у току тог ротационог кретања и угаоне брзине ω [rad/s] обртања радног кола, тј.:

$$P = \omega \cdot M , \quad (31)$$

а снага коју са собом доноси (турбине), или односи (нетурбине), радни флуид може се одредити као производ масеног протока и енергије (напора) коју радни флуид донесе (турбине) или изнесе (нетурбине) из турбомашине, тј.:

$$P_H = \dot{m} \cdot Y = \rho \cdot \dot{V} \cdot Y , \quad (32)$$

где је:

P_H [W] - хидрауличка снага хидрауличне турбомашине, изентропска, изотермска, или политропска снага топлотне турбомашине,

$\dot{m}$ [kg/s] - масени проток радног флуида кроз турбомашину,

ρ [kg/m³] - густина радног флуида,

$\dot{V}$ [m³/s] - запремински проток радног флуида кроз турбомашину,

Y [kg] - напор хидрауличне турбомашине, изентропски, изотермски, или политропски напор топлотне турбомашине.

На основу онога што је речено у јасно је да ниједна турбомашина не може, због постојања енергијских губитака, стопроцентно искористити расположиву струјну енергију радног флуида (турбине), или доведени технички рад (нетурбине). Према томе, степен корисности било које реалне турбомашине мора бити мањи од јединице.

Под степеном корисности подразумева се однос излазне (корисне) и улазне (расположиве) снаге.

У одељку о енергијским губицима у турбинама видело се да се могу идентификовати четири основне групе енергијских губитака и да се ефикасност претварања рада у турбини може побољшати уколико се ти губици смање. У циљу процењивања резултата конкретних пројектантских мера спроведених због смањивања појединих, раније побројаних, енергијских губитака погодно је целокупан процес размене енергије у турбини, због лакшег третмана, поделити на поједине фазе, па за сваку фазу засебно проучавати одговарајуће узрочно последичне везе између пројектантских мера и добијених резултата. Међутим, треба, још једанпут, јасно истаћи да се све фазе у раду турбина одвијају истовремено.

Процес размене енергије у турбинама обрнут је ономе који егзистира у нетурбинама. У турбину радни флуид уноси хидрауличку снагу P_H , а излазна (корисна) снага из турбине је она која се остварује на излазном вратилу турбине P .

Задржавајући потпуно исте називе и ознаке за одговарајуће снаге као и код нетурбина, могу се, на основу [Слике 17](#), успоставити следеће дефиниције појединих снага [7]:

$$P_H = \dot{m} \cdot Y = \rho \cdot \dot{V} \cdot Y , \quad (33)$$

$$P_{kn} = P_H - P_{\Delta Y_H} = \dot{m} \cdot Y_{th} = \rho \cdot \dot{V} \cdot Y_{th} , \quad (34)$$

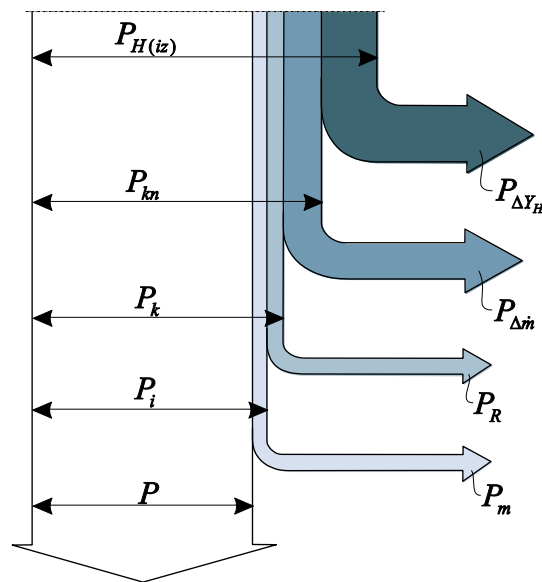
$$P_k = P_{kn} - P_{\Delta \dot{m}} = \dot{m}_k \cdot Y_{th} = \rho \cdot \dot{V}_k \cdot Y_{th} , \quad (35)$$

$$P_i = P_k - P_R = \dot{m}_k \cdot Y_i = \rho \cdot \dot{V}_k \cdot Y_i , \quad (36)$$

$$P = P_i - P_m = \omega \cdot M \quad (37)$$

Вратило турбине најчешће се спреже спојницом са вратилом генератора трофазне наизменичне струје. Улазна снага коју турбина остварује на вратилу генератора може се изразити, знајући његов фактор снаге $\cos\phi$, мерењем ефективних вредности напона U [В] и ефективне јачине струје I [А], које генератор остварује, на следећи начин [7]:

$$P = \frac{S \cdot \cos\phi}{\eta_G} \quad (38)$$



Слика 18. Дијаграм тока снаге у хидрауличној турбини

где је:

$S = U \cdot I$ [ВА] - привидна снага генератора,

η_G [-] - степен корисности генератора.

Следећи потпуно исти поступак који је спроведен за нетурбине и задржавајући исте ознаке за степене корисности, могу се за хидрауличне турбине успоставити следеће релације [7]:

$$\eta = \frac{P}{P_H} \quad (39)$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_H} , \quad (40)$$

$$\eta_m = \frac{P}{P_i} , \quad (41)$$

$$\eta = \frac{P}{P_H} = \frac{P}{P_i} \cdot \frac{P_i}{P_H} = \eta_m \cdot \eta_v , \quad (42)$$

$$\eta_H = \frac{P_{kn}}{P_H} = \frac{Y_{th}}{Y} = \frac{Y - \Delta Y_H}{Y} = 1 - \frac{\Delta Y_H}{Y} , \quad (43)$$

$$\eta_v = \frac{P_k}{P_{kn}} = \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}} = \frac{\dot{V}_k}{\dot{V}} = \frac{\dot{V} - \Delta \dot{V}}{\dot{V}} = 1 - \frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}} , \quad (44)$$

$$\eta_R = \frac{P_i}{P_k} = \frac{P_k - P_R}{P_k} = 1 - \frac{P_R}{P_k} = 1 - \xi_R , \quad (45)$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_H} = \frac{P_i}{P_k} \cdot \frac{P_k}{P_{kn}} \cdot \frac{P_{kn}}{P_H} = \eta_R \cdot \eta_v \cdot \eta_H , \quad (46)$$

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_H \cdot \eta_v \cdot \eta_R \cdot \eta_m . \quad (47)$$

Укупни степен корисности изведених хидрауличних турбина нешто је већи него код нетурбина и креће се у границама $\eta = (0.8 \div 0.95)$ [7].

Посебно се велика пажња поклања постизању високих степена корисности хидрауличних турбина великих снага, па се при њиховом пројектовању и изradi примењују најсавременије методе прорачуна, конструкцијског конципирања и обраде машинских делова. [7]

2.0 Приказ хидроакумулације Водојажа

У оквиру овог поглавља биће укратко приказане хидротехничке и хидроенергетске карактеристике хидроакумулације Водојажа, која је лоцирана у близини крагујевачког приградског насеља Грошница.

Грошничко језеро (Слика 19), или Водојажа, је вештачко језеро на Грошничкој реци и грађено је у периоду 1931—1938. Године.

Разлог градње је била потреба снабдевања Крагујевца водом. Пошто је општина Крагујевац сиромашна водом. Други назив језера, *Водојажа*, настао је од речи зајазити (преградити) и вода. Пошто је Грошничка река преграђена, или зајажена, отуда и назив Водојажа (преграђена вода).

Крагујевац се брзо развијао и потрошња воде се повећавала. Зато је 1962. брана поново дозидана. Сматрало се да ће се тако решити проблем снабдевањем града водом у наредних 10 до 15 година. Али се та пројекција показала нетачном, јер се град знатно брже развијао него што су то планери били предвидели, тако да су изграђена још два водоснабдевна система. Један на реци Гружа, где је направљена знатно већа хидроакумулација, а други на Великој Морави уз коришћење система рени бунара.

Данас се Крагујевац у највећој мери снабдева водом из гружанске хидроакумулације, моравски систем је резервни, а грошнички такође је резервни, при чему се из њега снабдевају водом оближња приградска насеља, са протоцима који су знатно мањи од оних који су планирани за Крагујевац. [8]



Слика 19 Приказ Грошничког језера



Слика 20 Брана „Водојажа“ на Грошничком језеру код Крагујевца (поглед из друге перспективе)

2.1 Технички опис хидропостројења Водојажа

2.1.1 Опште напомене о хидропостројењима

Хидротурбине су машине (претвараачи енергије) које претварају механичку енергију воде у електричну енергију, којом се снабдевају потрошачи, и оне често чине саставни део хидропостројења уз хидроакумулације. Таква хидропостројења имају задатак да искористе расположиву снагу воде, и да најповољније реше питање снабдевања електричном енергијом фабрика, погона друге врсте, градске потрошаче итд.

Расположива хидроенергија у хидроакумулацијама је прилично променљива величина зависна од годишњег доба и колебања протока. Потрошња енергије је, такође, мање или више, променљива у зависности од врсте потрошача и доба године. Ако је оптерећење хидропостројења долази од фабрика, онда је оно обично равномерно, поготово ако фабрике раде непрекидно. Ако су у питању градски потрошачи, онда је оптерећење неравномерно, јер домаћинствима није потребна иста количина енергије у свако доба дана, нити у свако доба године. Сувишна енергија може се акумулисати тако што се један део протока задржава у вештачком језеру да би се у погодном времену искористио.

Хидропостројења се, могу поделити према врсти искоришћења воде на:

- постројења са директним коришћењем протока,
- проточна постројења,
- акумулациона постројења,
- вршна постројења, и

- основна постројења за покривање вршних или основних оптерећења.

Друга подела хидропостројења може се извршити према величини протока и пада.
Постоје:

- мала постројења,
- средња и
- велика (преко 100.000 kW).

Проток кроз хидропостројења може да се креће од неколико литара у секунди до 300 м³/с.

Према величини пада, хидропостројења могу бити:

- ниског притиска (до 10 м),
- средњег (10 – 30 м) или
- високог притиска (преко 30 м пада).

Падови се крећу од пада мањег од 1 м, па до пада од 1.750 м.

Према начину управљања постројења могу бити:

- аутоматска и
- полуаутоматска.

Разноликост у грађењу хидропостројења изазивају теренске прилике, односно конфигурација терена, тако да не постоје два истоветна постројења.

Према теренским приликама и смештају постројења, разликују се две главне групе:

- хидропостројења са машинском зградом изван речног корита (са каналима или цевоводима),
- хидропостројења са машинском зградом смештеном у самом кориту реке.

2.1.2 Осврт на техничке карактеристике хидроакумулације Водојажа и на пратећа хидропостројења

Хидропостројење Водојажа служи за потребе снабдевања Крагујевца водом. Водовод је пројектован са капацитетом од 3 364 750 [m³] воде и то:

- | | | |
|----------------------------|-----------|-------------------|
| - За потребе града годишње | 1 830 750 | [m ³] |
| - За потребе индустрије | 1 054 000 | [m ³] |
| - За потребе Грошнице | 480 000 | [m ³] |

Такође је пројектован и резервоар на Ћави 3400 [m³] и цевовод са пречником од 350 [mm]. У склопу водовода пројектован је и систем за филтрирање воде.

Основни показатељи пројектовања грошничког система су:

- | | | |
|-------------------------------------|-----|----------------------|
| - Површина слива грошничке водојаже | 30 | [km ²] |
| - Просечне годишње падавине | 622 | [mm/m ²] |

- Просечни коефицијент отицања	0,273	
- Просечна годишња издашност слива	5430000	[m ³]
- Бруто запремина акумулације	2130000	[m ³]
- Кота успона	306	[m] [⁹]

У оквиру овог хидропостројења, налази се брана изграђена 29.11.1937-ме године. Уствари 31.01.1931-ве године почела је изградња брана, масивна, лучно-гравитационог типа, дужина бране у круни је 180 [m], висина са темељом 43,5 [m], а 26 [m] од дна језера до ивице прелива), али је 1955-те године због повећаног броја потрошача брана надвишена 7,3 [m].

Цевовод од хидроакумулације до филтера има пречник 700 [mm] и дужину 350 [m]. Цевовод према басену на Ћави доводи природним падом (без пумпе) пречником 450 [mm] и дужином око 7 [km]. Проток воде, од водовода је $Q_1 = 115$ [l/s] (стари цевовод) и $Q_2 = 65$ [l/s] (нови цевовод пречника 350 [mm]), максимални проток износи $Q_{\max} = 260$ [l/s]. Цевоводи су израђени од ливеног гвожђа. Цевовод од бране пре него што стигне до филтерског постројења, пролази кроз постројење мале хидроелектране, која је више 60 година изван погона.

Одводни цевовод прем филтеру приказан је на [Слици 21](#).

Зграда у којој су лоцирани мала хидроелектрана и пратећа постројења може се видети на [Слици 22](#), а њене димензија су 20[m]x10[m]x6[m].

На [Слици 23](#) и [Слици 24](#) је приказан унутрашњи изглед постројења из две перспективе.

Рачва цевовода за напајање водом басена на Ћави и Крагујевца, приказан је на [Слици 25](#).

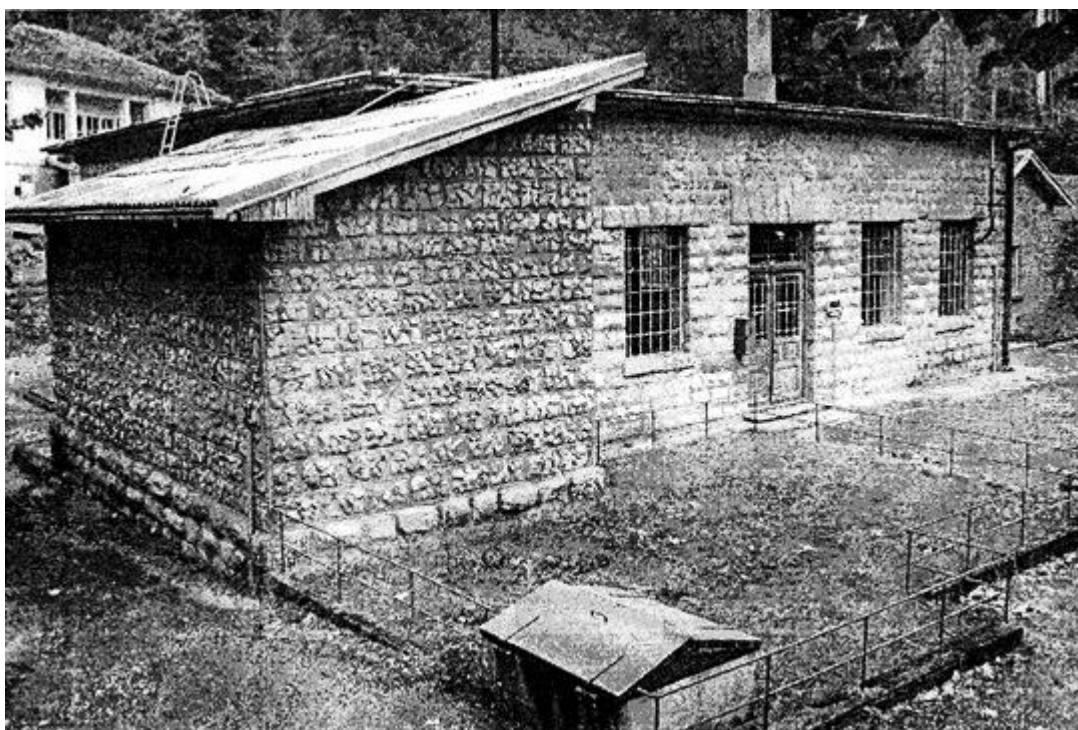
Филтерско постројење је приказано на слици 30 (а и б). На слици 30 (а) приказан је тложник, док је на слици 30 (б) приказан део где се одвија чишћење воде песком. Димензије таложника су $r = 6$ [m] и $H = 7$ [m].

Док су димензије унутрашњег дела филтерског постројења 22 [m]x 12 [m]x 8 [m].



Слика 21 *Део цевовода према филтерском постројењу у старој МХЕ
Грошница (Ф700)*

У постројењу се налази јонизатор (машина за јонизацију воде) приказана на [Слици 26](#), као и агрегат који више није у исправном стању, али постоји могућност репарације ([Слика 27](#)).



Слика 22 Спољашњи изглед зграде старе МХЕ Грошница



Слика 23 Унутрашњи изглед старе МХЕ Грошница (поглед из прве перспективе)



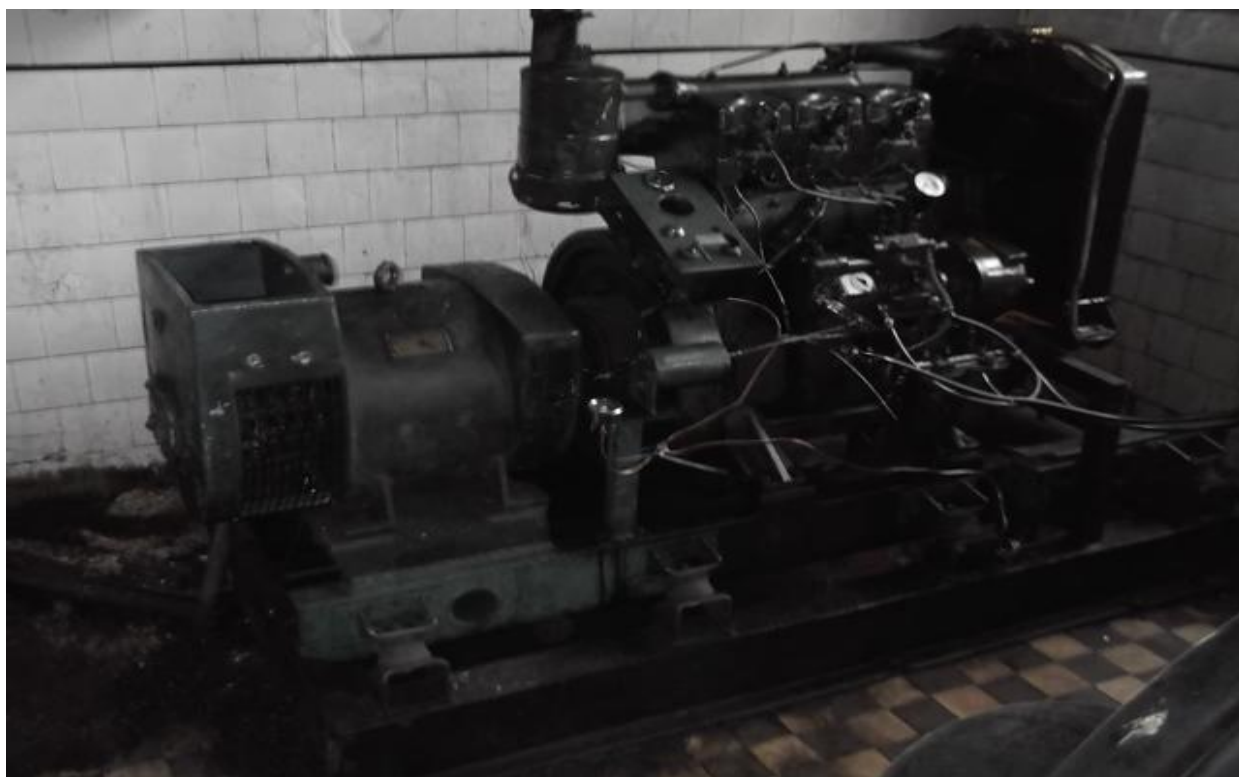
Слика 24 Унутрашњи изглед старе МХЕ Грошница (поглед из друге перспективе)



Слика 25 Рачва цевовода



Слика 26 *Јонизатор*



Слика 27 *Агрегат*

2.2 Посебан осврт на малу хидроелектрану у хидропостројењу Водојажа

у овом одељку ће бити објашњене основне техничке и енергетске карактеристике турбина, генератора и регулационе опреме у малој хидроелектрани која је својевремено изграђена ради снабдевања прибранских постројења и озонатора електричном енергијом и за осветљавање бране, управних зграда и кућа у оближњом насељу Грошница.

У овом одељку поменућу мало опширније о типу бране, филтера и турбине који су били у употреби.

2.2.1 Лучно-гравитациона брана

Лучно-гравитациона брана је заобљена брана са карактеристикама како лучне бране тако и гравитационе бране. То је брана која кривуда узводно уз криву која се сужава, тако да усмерава већину воде ка каменим зидовима кањона, пружајући силу за сабивање бране. Оваква брана комбинује предности ове две врсте брана и сматра се компромисом између њих. Оне су направљени од "[Roller Compacted Concrete \(RCC\)](#)", или су [зидане](#). Лучно-гравитационе бране нису ојачане, осим на месту прелива. Типичан пример конвенционалне бетонске бране је [Хуверова](#) Брана. [Чангинола](#) Брана је пример RCC лучно гравитационе бране. Гравитациона брана захтева велики обим унутрашњег пуњења. Лучно-гравитациона брана може бити тања од чисте гравитационе бране и захтева мање унутрашње пуњења.

Лучно-гравитационе бране су масивне бране од бетона који се одупиру потиску воде, захваљујући својој тежини, користећи силу гравитације и лучну акцију.

Лучно-гравитациона брана обухвата лучни закривљени дизајн који је много ефикасан у скретању воде у уским стеновитим местима, где су стране клисуре од тврдог камена и па је воде присиљена да тече у уски канал. Зато је потребан узак распон за ове бране; заобљени дизајн бране ефикасно успорава воду у резервоару користећи мању количину грађевинског материјала.

Када се, лучно-гравитационе бране, правилно поставе на одговарајућем месту, комбинујући квалитете пружања отпора, од обе, и гравитационе и лучне бране, она улива највише поверења у широј публици, због појаве, своје, велике истрајности. Међутим, савијена гравитациона брана може да изгледа јаче, али неки од ових ефекта може бити психолошки фактор, у операцији, у прављењу избора стила бране. [¹⁰]

2.2.2 Филтерско постројење – брзо-пешчани филтер

Брзо-пешчани филтер или брзо-гравитациони филтер је врста филтера која се користи за пречишћавање воде и обично се користи у општинским објектима, постројењима воде за пиће као део вишефазног система лечења воде.

Први модерни брзо-пешчано филтерско постројења је пројектовао и изградио Џорџа Фулер у Литл Фалсу, Њу Џерси. Фулерово постројење за филтрирање кренуло је у рад 1902-ге године, а његов успех је одговоран за промену ове технологије у САД. Брзи-пешчани филтери су били у широкој употреби у великим општинским водоводним системима од 1920-их година, јер им је била потребна мања површином земљишта, поређењу са спорим-пешчаним филтерима.

Брзо-пешчани филтери користе релативно груб песка и друге зрнасте медије за уклањање честица и нечистоћа које су заробљене у флоку (производ [флокулације](#)) кроз употребу флокулацијских хемикалија - обично соли алуминијума или гвожђа. Вода и флок протичу кроз [медијум филтера](#) под гравитацијом или под притиском упумпавања и флокулирани материјал остаје заробљен у матрици песка.

Мешање, флокулација и таложње су типични процеси фаза лечења које претходе филтрацији. Хемијски адитиви, као што су коагулатори, често се користе у комбинацији са системом филтрације.

Врсте:

- Гравитационог типа: нпр. Патерсонов филтер;
- Притисног типа: нпр. Кандијев филтер.

Систем за дезинфекцију (обично користе хлор или озон) се најчешће користи после филтрације. Брза-пешчана филтрација има веома мали утицај на укус и мирис, и раствара нечистоће из воде за пиће, осим ако је активни угаљ укључен као филтерски медијум.

Брзе-пешчане филтере треба чистити често, често више пута дневно, [повратним прањем](#), које укључује обртање смера воде, и додавање компримованог ваздуха. Током повратног прања, "постеља" је флуидизована, и мора се водити рачуна да се не сперу медији.

Брзи-пешчани филтери су обично дизајнирани као део вишестепених третманских система, који се користе од стране великих општина. Ови системи су комплексни и скупи за руковање и одржавање, па самим тим мање погодни за мале заједнице и земље у развоју.

Предности су:

- Много већи проток од споро-пешчаних филтера, око 150 до 200 милиона литара воде дневно по хектару;
- Захтева релативно малу површину;
- Мање осетљиви на промене квалитета сирове воде (нпр. замућеност);
- Захтева мање количине песка.

Недостаци су:

- Поре великих величина, без коагуланта или флокуланата, неће моћи да уклоне патогене, као Цритоспоридиум, мање од 20 микрона;
- Захтева веће одржавања од спорих-пешчаних филтера. Из овог разлога, обично се не класификује као "одговарајућа технологија", као израз који се примењује у мање развијеним земљама;

- Генерално неефикасан против проблема укуса и мириса;
- Производи велике количине муља за одлагање;
- Захтева да буду инвестиције у току, за скупе реагенсе флокулације;
- Третман сирове воде са хемикалијама је од суштинског значаја;
- Стручни надзор је од суштинског значаја;
- Не може да уклони батерије;
- Трошкови одржавања су већи. [¹¹]

2.2.3 Осврт на Francis-ове турбине које представљају основни структурни део мале хидроелектране Водојажа

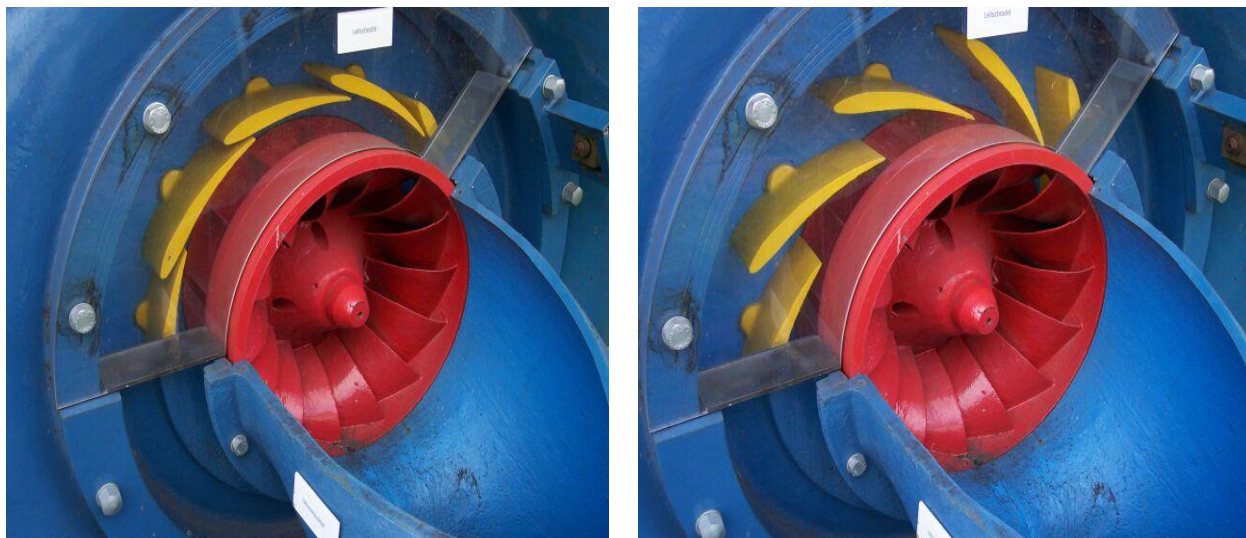
Као што је већ речено у поглављу 2., Francis-ове турбине су турбине реакцијског типа. Радни флуид код овог типа турбина, долази до турбине под великим притиском и енергија флуида се екстрактује уз помоћ спирале, усмерних лопатица и лопатица радног кола, из радног флуида и претвара у механички рад обртног кретања њеног радног кола и вратила на који је оно насађено. Механичка енергија се у овим турбинама добија, претежно, из притисне енергије радног флуида, док је удео кинетичке енергије мањи. На излазу, из турбине вода износи део кинетичке и притисне енергије, и обично се даље проводи кроз дифузор (Слика ...)

На сликама [28](#), [29](#) може се видети:

- спољни изглед Francis-ове турбине са електричним генератором (Слика [28](#)),
- попречни пресек Francis-ове турбине са лопатицама преткола (жуто обојене), које се синхронно могу закретати око својих оса ради регулације протока, снаге и броја обртаја радног кола (Слика [29 \(а\)](#) у минималном подешавању протока; Слика [\(б\)](#) у максималном подешавању протока). [¹²]



Слика 28 Изглед Францисове турбине



Слика 29 Попречни пресек са лопатицама, Францисове турбине у минималном (а) и максималном (б) подешавању протока

2.3 Опис неопходних реконструкционо-репаративних послова које је потребно урадити да би мала хидроелектрана у хидропостројењу Водојажа била стављена у погон

Постоји превелики број реконструкционо-репаративних послова који су потребни да се би се МХЕ Грошница ставила у погон, тако да је одлучено (јер је исплативије, сигурније, и енергетски ефикасније) да се изгради нова МХЕ у Грошници. Што се тиче старе МХЕ, одлучено је да се не репарира у сврху производње електричне енергије (једина радња у вези старе МХЕ могућа, је репарације у сврху историјско-музејске природе).

3.0 Потребни документи за изградњу/репарацију и прикључивање малих хидроелектрана (МХЕ) на електродистрибутивну мрежу

Процедура за добијање свих потребних докумената који су према важећој законској легислативи неопходни за градњу малих електрана (МХЕ) је дуга и компликована. Према искуству неких инвеститора, ова процедура уобичајено траје више од једне године. Будућим поједностављењем, процедура би требала бити аутоматизована и овај временски период би требао бити скраћен.

Прописи који се односе на изградњу МХЕ и производњу електричне енергије могу бити класификовани у две групе:

- група прописа којом се регулишу одобрења за изградњу/репарацију,
- група прописа за стицања права на обављање делатности производње електричне енергије.

Првом групом прописа уређује се потреба за изградњом/репарацијом, начин добивања одобрења за изградњу/репарацију и начин добивања одобрења за употребу самог објекта. Ова група прописа регулирана је:

- 1 Законом о планирању и изградњи;
- 2 Просторним планом Републике Србије;
- 3 Урбанистичким и просторним плановима јединица локалних самоуправа.

Друга група прописа уређује добијање права на обављање делатности производње електричне енергије. Овај процес се састоји од две фазе: у првој фази апликант добива дозволу за обављање делатности од општег интереса. Група прописа ове фазе регулисана је:

- 4 Законом о јавним предузећима и обављању делатности од општег интереса;
- 5 Законом о водама;
- 6 Уредбом о висини накнаде за коришћење воде, накнаде за заштиту вода и накнаде за извађени материјал из водотока за 2007. годину;
- 7 Правилником о садржају техничке документације која се подноси у поступку за добивање водопривредне сагласности и водопривредне дозволе;
- 8 Законом о заштити животне средине;
- 9 Законом о промени утицаја на животну средину;
- 10 Уредбом о утврђивању Листе пројеката за које је обавезна процена утицаја и Листе пројеката за које се може захтевати процена утицаја на животну средину;
- 11 Правилником о садржају захтева о потреби процене утицаја и садржају захтева за одређивање обима и садржаја студије о процени утицаја на животну средину;
- 12 Правилником о садржају студије о процени утицаја на животну средину.

Друга фаза регулише начин добивања дозволе за обављање енергетске делатности. Група прописа ове фазе регулисана је:

- 13 Законом о енергетици;
- 14 Законом о ратификацији Уговора о оснивању Енергетске заједнице...;
- 15 Уредбом о условима испоруке електричне енергије;
- 16 Правилником о критеријумима за издавање енергетске дозволе, садржају захтева и начину издавања енергетске дозволе;
- 17 Правилником о условима у погледу стручног кадра и начину издавања и одузимања лиценце за обављање енергетских делатности;
- 18 Стратегијом развоја енергетике Републике Србије;
- 19 Програмом остваривања Стратегије развоја енергетике Републике Србије. [¹³]

3.1 Поступак изградње/репарације МХЕ

У овом одељку ће укратко бити приказан уобичајени поступак који је потребно спровести приликом припреме документације потребне за добивање дозволе за изградњу МХЕ. Приликом припреме за изградњу репарацију документације неопходне за изградњу/репарацију МХЕ неопходно је спровести следећи поступак:

- Припремити захтев за издавање енергетске дозволе;
- Извод из урбанистичког плана или акт о урбанистичким условима;
- Акт надлежног органа о намени земљишта на којем ће се градити енергетски објекат
- Елаборат о изградњи енергетског објекта за који се тражи енергетска дозвола;
- Изјава банке да је спремна да прати подносиоца захтева;
- Доказ о одговарајућој кредитној способности;
- Мишљење оператора преносног или дистрибутивног система за електричну енергију;
- Водопривредни услови;
- Водопривредна сагласност.

Ради добивања одобрења за изградњу МХЕ неопходно је урадити следеће:

- Припремити захтев за издавање одобрења за изградњу.

Ради приступања радовима за изградњу/репарацију МХЕ потребно је урадити:

- Претходну студију оправданости;
- Студију оправданости;
- Техничку документацију потребну за изградњу МХЕ.

Грађење МХЕ и технички преглед објекта обавља се по следећој процедури:

- Грађење објекта, односно извођење радова;
- Технички преглед објекта;
- Пробни рад и
- Добивање употребне дозволе. [¹³]

4.0 Посебне специфичности постојеће МХЕ на Водојажи

У оквиру овог одељка биће указано на неке специфичности постојеће и неактивне МХЕ на Водојажи и на радове које би било неопходно извршити на МХЕ која је лоцирана у прибранском делу бране на Водојажи да би она могла да буде стављена у функцију. Такође ће бити продискутовано да ли би ти реконструктивни захвати били изводљиви и исплативи.

Према подацима који су скупљени за у току израде овог рада (тј., према подацима до којих сам могао да дођем), може се приметити да је репарација постојеће МХЕ неисплатива, и технички неизводљива, јер се очним прегледом може лако констатовати да она није никада конзервирана и да готово ни један део овог објекта не би био употребљив након демонтаже, јер је ова МХЕ ван погона преко 70 година.

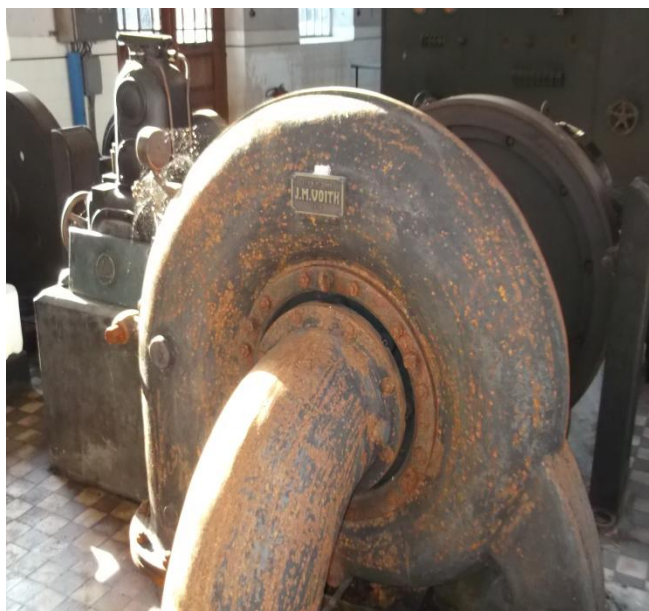
На сликама 30. и 31., приказан је садашњи изглед и стање турбина и пратеће опреме која чини ову МХЕ.

Потребно је рећи да постројење, док је радило, имало је две турбине. Прва трбина је производила једносмерну струју (DC.), која се користила за јонизацију (пречишћавање) воде (из незваничног извора сам сазнао да је тад вода за пиће била најчистија); док је друга турбина производила наизменичну (AC) струју потребну за рад постројења (електрична струја у насељу није постојала све до 1950.-те године).

Три су основне предности *јонизоване воде*, о којима ће у наредном тексту бити речи.



Слика 30 Изглед постојећих хидротурбина у даљем кадру



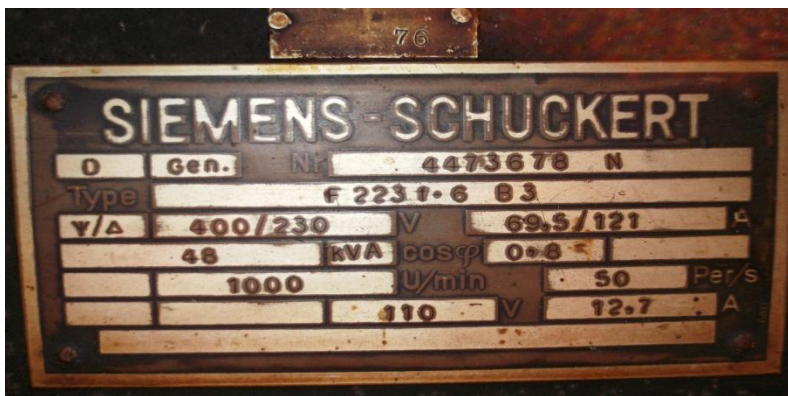
Слика 31 Изглед хидротурбине у ближем кадру (Хидротурбина наизменичне струје)

Главна и прва је њена антиоксидативна моћ. Штета од слободних радикала подстиче старење и узрокује болест. Будући да је јонизована вода течни антиоксиданс, врло лако се упија у тело, што њен учинак чини већим и моћнијим као антиоксиданс. . Када јонизовани антиоксиданс у облику хидроксидних јона (молекула кисеоника с додатним електроном) своје додатне јоне препусти слободним радикалима (молекула кисеоника којој недостаје један електрон), тело задржавате пуно кисеоника. Јонизована вода даје човеку енергију која снабдева његово тело са пуно кисеоника! То је једна од изванредних погодности јонизоване воде.

Друга је предност овако третиране воде за пиће је у томе што јонизована вода уравнотежује рН вредност у телу, јер је врло алкална.



Слика 32 Лого фирме "Voith"



Слика 33 Почица са генератора „Siemens-Schuckert“

Јонизована вода првенствено делује као превентивна мера, али у случају обољења помаже човеку у процесу оздрављења.

Као треће, јонизована вода има различите димензије молекуларних скупина. Садржи само 5 до 6 молекула воде уместо 10 до 13 колико их је у молекуларним групама конвенционалне воде. Две су последице тога. Прво, јонизована вода је хидратантнија од конвенционалне воде и, друго, делује као снажан детоксикатор. Детоксикацијска својства јонизоване воде моћна су и задивљујућа. Једноставно не могу бити занемарена. Јонизатор воде има различите нивое интензитета јер просечна особа не може почети пити снажну јонизовану воду. То се посебно односи на старије особе које треба дају почети почну полако, са најнижег нивоа. Људи који су цели живот гомилали кисели отпад у својим телима ће патити од главобоља и пробавних тегоба ако нагло почну пити јонизовану алкалну воду са високог високих нивоа нивоом рН вредности.

Такође је важно рећи да је турбине произвела Немачка фирма Voith, 1936.-те године (што се и може видети на [Слици 32](#)), а генераторе, такође Немачка фирма, Siemens-Schuckert (што се и може видети на [Слици 33](#)).

4.1 Кратке напомене о фирми "Voith" која је произвођач турбина уграђених у МХЕ на Водојажи, као потенцијалном испоручиоцу нове МХЕ за Водојажу

"Voith" 1870-те године произвела своју прву хидрауличну турбину. У наредним годинама, компанија је преузела контролу на Немачком, а затим и на међународном тржишту хидроелектрана. Убрзо након тога, "Voith" је постао кључни партнер у готово свим великим пројектима тог времена, па, ето и у градњи МХЕ на Водојажи.

На почетку прошлог века "Voith" је реализовала спектакуларну поруџбину из Канаде која се односила на пројекат Хеиденхеим. Фирма "Voith" је тада добила уговор за испоруку турбине и за "Ontario Power Company" на Нијагариним водопадима. Између 1903-те и 1913-те, компанија је испоручила укупно 12 Francis-ових спиралних турбина за Канаду. Двоструке турбине ("twin turbines"), свака капацитета од преко 12000 HP (коњска снага), - тј. око 8951.99 KW, биле су међу највећима и најјачима у том времену. Друга поруџбина која се исто тако издваја тих година у производњи компаније "Voith", била је прва испорука за Кину. Године 1910-те, компанија је инсталирала турбину у "Shi Long Ba" хидроцентралу у провинцији Јунан. Ово је била прва Кинеска хидроелектрана. [14]

4.2 Дискусија о могућностима за репарацију постојеће МХЕ на Водојажи и оправданости таквог захвата

Један од проблема је проблем *корозије*.

Корозија је штетно и непожељно трошење различитих конструкцијских материјала (обично метала) хемијским деловањем гасова, паре или капљевина из околине. Одликује се најчешће нагризањем и разарањем површине, чиме се мењају својства материјала, као и употребна својства уређаја и техничких система који су од њих израђени.

Најпознатија је корозија цевовода. То је оштећење цевовода због електрохемијске реакције при којој настају јони метала у електролиту. Најчешће је корозија последица електролизе, тј. стварања галванског чланка на самом цеководу, па се троши зид цевовода као анода. Различити штетни гасови проузрокују и друге врсте корозије: угљендиоксид (слатку корозију), водоник сулфид (киселу корозију), а кисеоник (кисеоникову корозију). Цеовод се од корозије заштићује катодном заштитом (Слика 34). [15]

Други проблем је проблем *каменаца*.

Каменац је тврд, загасито бели, кредасти депозит који се накупља у котловима, бојлерима за топлу воду и унутар неадекватно одржаваног система за централно грејање топлом водом. Он се често налази као депозит на унутрашњој површини старих цеви и других површина где је "тврда вода" испарила. Осим што је ружан и тежак за чишћење, каменац озбиљно нарушава деловање па тако и штети различитим компонентама. [16]

“Тврда вода” је вода која има висок садржај минерала (за разлику од "меке воде"). Тврда пијаћа вода генерално није штетна по здравље, али може да представља озбиљне



Слика 34 *Корозија цев*



Слика35 *Прозор, под притиском, напрегнут ка унутрашњости просторије*



Слика 36 *Једна од многих дотрајалих цеви у хидрауличном систему водовода МХЕ Водојажа*
 проблеме у индустријским системима, где се тврдоћа воде прати да би се избегли скупи кварови у котловима, расхладним торњевима, и другој опреми који се налази вода. [¹⁷]

Трећи, ако не и највећи проблем, је проблем саме зграде. Наиме зграда полако тоне, зидови су испрсли, укључујући и бетонске стубове. Од великог притиска, које ствара сама зграда, због лошег стања стубова, пуцају цеви које се пролазе испод зграде. На [Слици 35](#) да се приметити прозор, који је од силине притиска напрегнут (у овом случају) ка унутрашњости просторије, а на [Слици 36](#), видећете да на цеви недостаје део, услед горе поменутих проблема, као и, вероватно, многих других проблема (старост,...).

Такође један од већих проблема је старост турбина и цевовода, као и само одржавање ових објеката. Ове турбине нису радиле дуго времена, нису конзервиране, нити одржаване, а нису ни очишћене (вероватно) након престанка њихове употребе

Због ових проблема, и због проблема попут могућности земљотреса (и земљотрес мале јачине може довести до рушења ове зграде), ја, не препоручујем репарацију ове

МХЕ у сврху производње енергије, зато што сама репарација се неће испоставити вредом уложеног труда и материјала, такође верујем да, ако би машине радиле у пуном јеку и са максималном снагом (пошто постоји рачва која један део даје воде даје турбинама, а други води пумпама за воду за

снабдевање становника, тако да не би могле да раде цео дан), њихова економичност би се исплатила за најмање 10-так година (ако би се и исплатила тако брзо).

Због ових разлога, као и због других разлога, предлажем изградњу нове МХЕ, а што се тиче репарације, предлажем је, ради историјске сврхе (ако се буде, уопште, и репарирала).

4.3 Дискусија о могућностима за изградњу нове МХЕ на Водојажи и оправданости таквог захвата

Овај део ће се бавити разлозима за изградњу нове МХЕ Грошница, и уопште могућности о томе.

Тачно је да ће изградња нове МХЕ на Водојажи звучати веома скупо и неисплативо, али је није све тако. Наиме изградња ће бити скупа, али у случају изградње проточне МХЕ, која ће се повезати на главни вод (ток) цевовода, сва вода може протицати кроз МХЕ. У случају да је постоје разлози због којих је потребно искључити турбине, постојаће рачва на којој ће се затварати вентил испред МХЕ, или испред другог дела цевовода, тако да ће вода заобићи МХЕ.

Значи, кроз МХЕ, ће моћи проћи укупан проток са бране који износи око 325 (тачан ће се приказати у делу са прорачунима), а пошто би локација нове МХЕ била око 100-тинак метара од бране, хидраулички губици ће бити минимални, па се могу и изоставити (у рачуну ће се ипак користити). Самим тим и производња електричне енергије ће бити много већа (пошто ће се сирова вода кретати кроз турбине, и настављати даље према филтрирању воде, турбине ће бити у могућности непрекидног рада).

5.0 Прорачун енергетских параметара за изградњу нове МХЕ на Водојажи

У овом одељку израчунаће се основни енергетски пројектни параметри за градњу нове МХЕ на Водојажи.

Познато је да је Грошничка акумулација од седамдесетих година прошлог века постала резервна за град Крагујевац, јер је тада почела да функционише велика хидроакумулација „Гружа“. Та акумулација сада представља доминантног снабдевача Крагујевца питком водом. Из акумулације Грошница данас се питком водом снабдева неколико оближњих насеља, па је промењен проток од акумулације кроз одводни цевовод и филтерско постројење. Због тога је расположива хидраулична снага која стоји потенцијалној МХЕ различита од оне пројектне која је коришћена при пројектовању и градњи постојеће МХЕ.

5.1 Подаци о доводном цевоводу

Основни подаци о цевоводу од акумулационог језера до места где је могуће поставити нову МХЕ дати су у табелама [1](#) И [2](#).

Табела 1 Прорачун унутрашњег пречника доводног цевовода

Ф(спољашње)	d[mm]	d[m]
711.00	700.00	0.7

Табела 2 Прорачун потребних података

λ	L[m]	L/d
0.02	100.00	142.96

Прво ће бити приказана методологија прорачуна бруто пада МХЕ, и изложене основне формуле и подаци (геометријски и хидраулички) који ће се користити за прорачун, а затим ће бити дефинисан дијаграм расположиве хидрауличке снаге на улазу у нову МХЕ. Потом ће бити изабран тип турбине, дефинисана називна снага, број обртаја и проток турбине, и дефинисан тип турбине.

Нето напор турбине може се одредити помоћу израза ^[7]:

$$Y = g \cdot H - (c^2/2) \cdot (\Sigma \zeta + \lambda \cdot L/d) \quad (48)$$

где је:

$g [m/s^2]$ – убрзање земљине теже ($g=9,81 [m^2/s]$),

$H [m]$ – бруто пад турбине (у конкретном случају $H= 30 [m]$),

$\Sigma \zeta [-]$ – локални губици у доводном цевоводу (износе 10% губитака услед трења у праволинијском делу цевовода),

$\lambda [-]$ – коефицијент отпора услед трења у праволинијским деоницама цевовода (у конкретном случају износи $\lambda=0,02$),

$L [m]$ – дужина доводног цевовода (у конкретном случају износи $L=100 m$),

$d [m]$ – унутрашњи пречник доводног цевовода (у конкретном случају износи $d=0,7 m$),

$c[m/s]$ - брзина струјања воде у доводном цевоводу, која се може дефинисати преко протока кроз цевовод уз помоћ израза (48):

$$c= V/(d^2 \cdot \pi/4)= 4V/d^2 \cdot \pi \quad (49)$$

где је $V [m^3/s]$ – тренутни проток воде кроз турбине. [7]

Заменом претходних величина у израз за нето напор турбине (48) добија се:

$$\begin{aligned} Y &= g \cdot H - \{ [V/(d^2 \cdot \pi/4)]^2 / 2 \} \cdot 1,1 \cdot (\lambda \cdot L/d) = \\ 9,81 \cdot 30 - \{ [V/0,7^2 \cdot 3,14/4]^2 / 2 \} \cdot 1,1 \cdot (0,02 \cdot 100/0,7) &= \\ = 294,3 - 90,09872 \cdot V^2 \end{aligned} \quad (50)$$

Хидрауличка снага турбине може се представити изразом:

$$Ph = \rho \cdot V \cdot Y / 1000 = 1000 \cdot V \cdot Y / 1000 = Y \cdot V \quad (51)$$

где су:

$Ph [kW]$ – хидрауличка снага турбине,

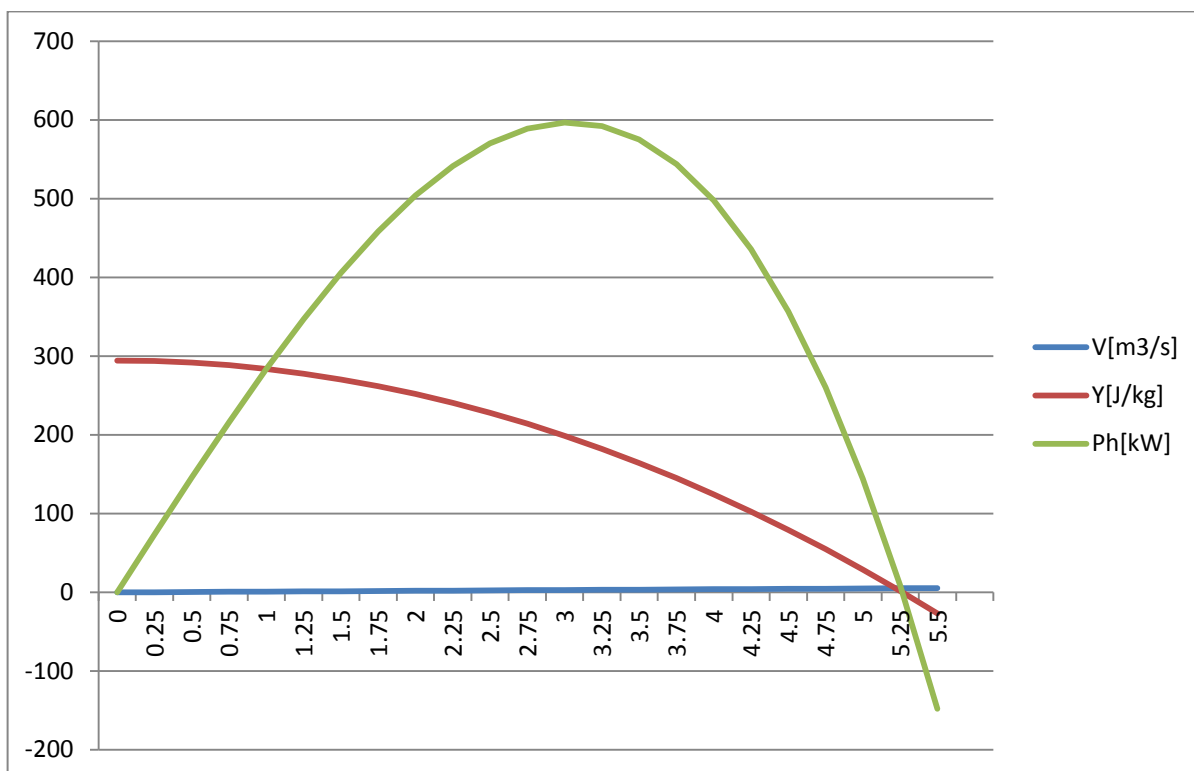
$\rho [kg/m^3]$ – густина воде која протиче кроз турбине.

На основу израза (50) и (51), може се табеларно приказати функционална зависност нето напора турбине и хидрауличке снаге турбине у функцији протока кроз турбине (Табела 3 И Слика 37).

Табела 3. Израчунате вредности нето напора и хидрауличке снаге турбине од протока

$V[m^3/s]$	$Y[J/kg]$	$Ph[kW]$
0	294,4	0
0,25	293,7362	73,43405
0,5	291,7448	145,8724
0,75	288,4257	216,3193
1	283,7791	283,7791

1,25	277,8048	347,256
1,5	270,5029	405,7543
1,75	261,8733	458,2783
2	251,9162	503,8324
2,25	240,6314	541,4207
2,5	228,0191	570,0477
2,75	214,0791	588,7174
3	198,8115	596,4344
3,25	182,2162	592,2027
3,5	164,2934	575,0268
3,75	145,0429	543,9108
4	124,4648	497,8592
4,25	102,5591	435,8761
4,5	79,32576	356,9659
4,75	54,76482	260,1329
5	28,87625	144,3813
5,25	1,660066	8,715345
5,5	-26,8837	-147,861



Слика 37 Функционална зависност нето напора турбине и хидрауличке снаге турбине у функцији протока кроз турбине

5.2 Избор турбине на за МХЕ на Водојажи

Уобичајени проток који се у последњих десет година испоручује потрошачима износ је $V = 326[\text{l/s}]$, odnosno $V = 0,326[\text{m}^3/\text{s}]$. [7]

Расположиви нето напор за нову МХЕ при протоку $V = 0,326[\text{m}^3/\text{s}]$ дат је у табелама 4 И 5.

Табела 4 Прорачун нето напора турбине

$d^2[\text{m}^2]$	$V[\text{l/s}]$	$V[\text{m}^3/\text{s}]$	π	c	c^2
0.49	326.00	0.326	3.14	0.8471	0.7176

Табела 5 Прорачун нето напора турбине

$g[m/s^2]$	$H[m]$	$c^2/2$	$\Sigma \epsilon + \lambda \cdot L/d$	$Y[J/kg]$
9.81	30.00	0.36	3.929	292.89

При овом протоку и бруто паду од $H = 30 [m]$, турбине би могла да развије номиналну снагу:

$$Ph_n = \rho \cdot V \cdot Y / 1000 = 1000 \cdot 0,326 \cdot 292,89 / 1000 = 95,48 [kW] \quad (52)$$

Односно номиналну снагу на вратилу турбине:

$$P_n = \eta \cdot \rho \cdot V \cdot Y / 1000 = 0,85 \cdot 1000 \cdot 0,326 \cdot 292,89 / 1000 = 81,16 [kW] \quad (53)$$

Пошто нето снага при задатом протоку пада лево од оптималног протока ($\approx 1 m^3/s$, види [Слику 37](#)), при коме би турбине развијала максималну хидрауличку снагу, онда се може изабрати турбине номиналне снаге $P_n = 81,16 [kW]$.

За градњу МХЕ изабраће се две турбине. Једна снаге $55 [kW]$, и друга снаге $35 [kW]$ и уградиће се у постројење према идејној шеми приказаној у оквиру наредног текста.

5.3 Избор генератора МХЕ

Генератори ових снага за рад МХЕ паралелно ЕД мрежи, користе се асинхрони трофазни мотори који кад се прикључе у мрежу, и „заврте“ синхроним брзином, узимају реактивну енергију из мреже, а у мрежу испоручују активну енергију. Изабрани су следећи генератори ^[18]:

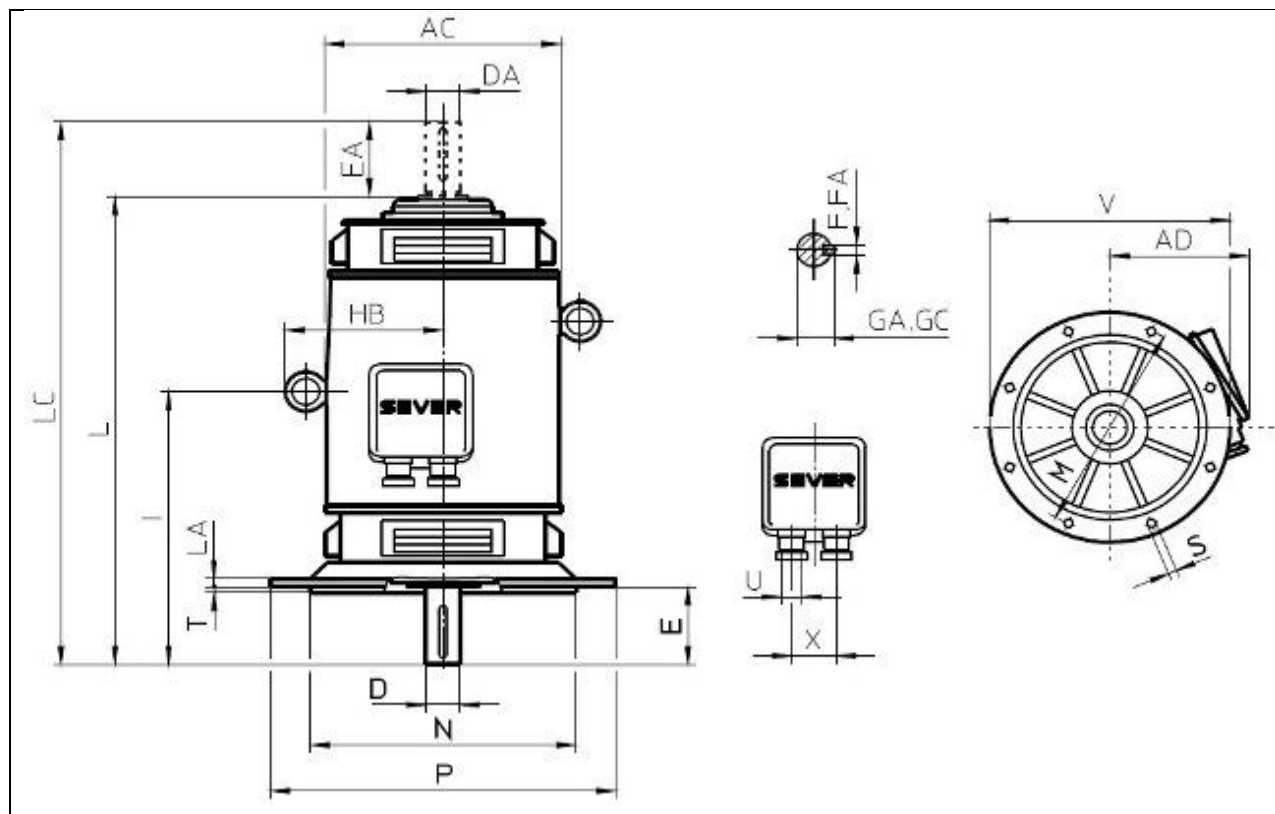
- За снагу турбине од $55 [kW]$ ($n = 1500 [^\circ/\text{мин}]$), изабран је генератор GOK 225-M4
- За снагу турбине од $35 [kW]$ ($n = 1500 [^\circ/\text{мин}]$), изабран је генератор GOK 200-M4

Подаци о генераторима су приказани у табели 6.

Облик уградње биће 1MV1, за уградњу са вертикалним положајем вратила (Слика 38 и Табела 7).

Type	P_N kW	n min^{-1}	η %	$\cos \phi$	I_N A	M_m Nm	I_p/I_N	M_p/M_N	M_m/M_N	RC	J kgm^2	Mass kg
OK 200 M-4	37	1465	90,0	0,82	73,0	241	4,7	2,1	2,1			
OK 200 L-4	45	1465	90,0	0,80	90,3	293	4,9	2,1	2,1			
OK 225 M-4	55	1480	92,5	0,84	102,0	355	7,2	2,6	2,8			

Табела 6 Подаци о генераторима (исечак из каталога, $n = 1500$ [$^\circ/\text{мин}$]). [18]



Слика 38 Шема уградње са вертикалним положајем вратила (исечак из каталога). [18]

Type	Numb of poles	Flange designation	AC	AD	D	DA	E	EA	F FA	GA GC	HB	I	L	LA	LC	M	N	P	S	Num of holes	T	V	U	X
OK 200 M L	2;4;6;8	F 500-I	394	317	60	60	140	140	18	64	262	473,5	801	22	946	500	450	550	19	8	5	592	Au 36x27	70
												493,5	839		984									
OK 225 M	2	F 500-I	436	340	60	60	140	140	18	64	287	515	889	22	1029	500	450	550	19	8	5	615	Au 36x27	70
	4;6;8				65	65				69														

Табела 7 Подаци за шему приказаној на слици ЦЦЦ (исечак из каталога, подаци су у милиметрима [mm]). [18]

5.4 Избор типа турбине

Код хидрауличних турбина се специфични број обртаја (значица), због одређених погодности, дефинише с обзиром на снагу према обрасцу (54) [7]:

$$n_{sp} = \frac{n \cdot P^{\frac{1}{2}}}{Y^{\frac{5}{4}}}, \quad (54)$$

где су:

n [°/min] – број обртаја радног кола турбине,

P [kW] – снага турбине,

Y [J/kg] – нето напор турбине.

Пошто имамо:

$H_{br} = 30$ [m]

$n = n_1 = n_2 = 1500$ [°/min]

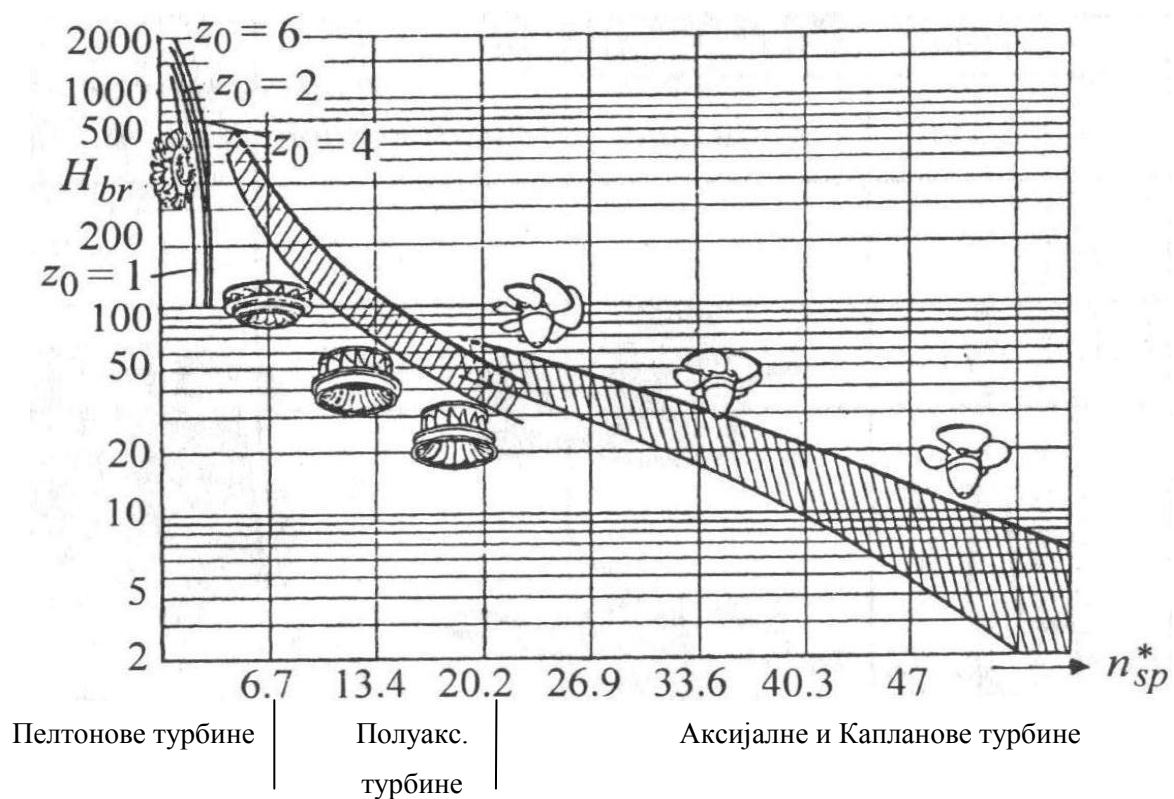
$Y = 292.89$ [J/kg]

Према обрасцу (54), имамо да су значице специфичног броја обртаја једнаке вредностима из табеле 8 [7].

Табела 8 Прорачун значица специфичног броја обртаја

R.br.	n [°/min]	P [kW]	Y [J/kg]	$\sqrt{P}$	$\sqrt[4]{Y^5}$	n_{sp}
1	1500	55	292.89	7.42	1211.66	9
2	1500	35	292.89	5.92	1211.66	7

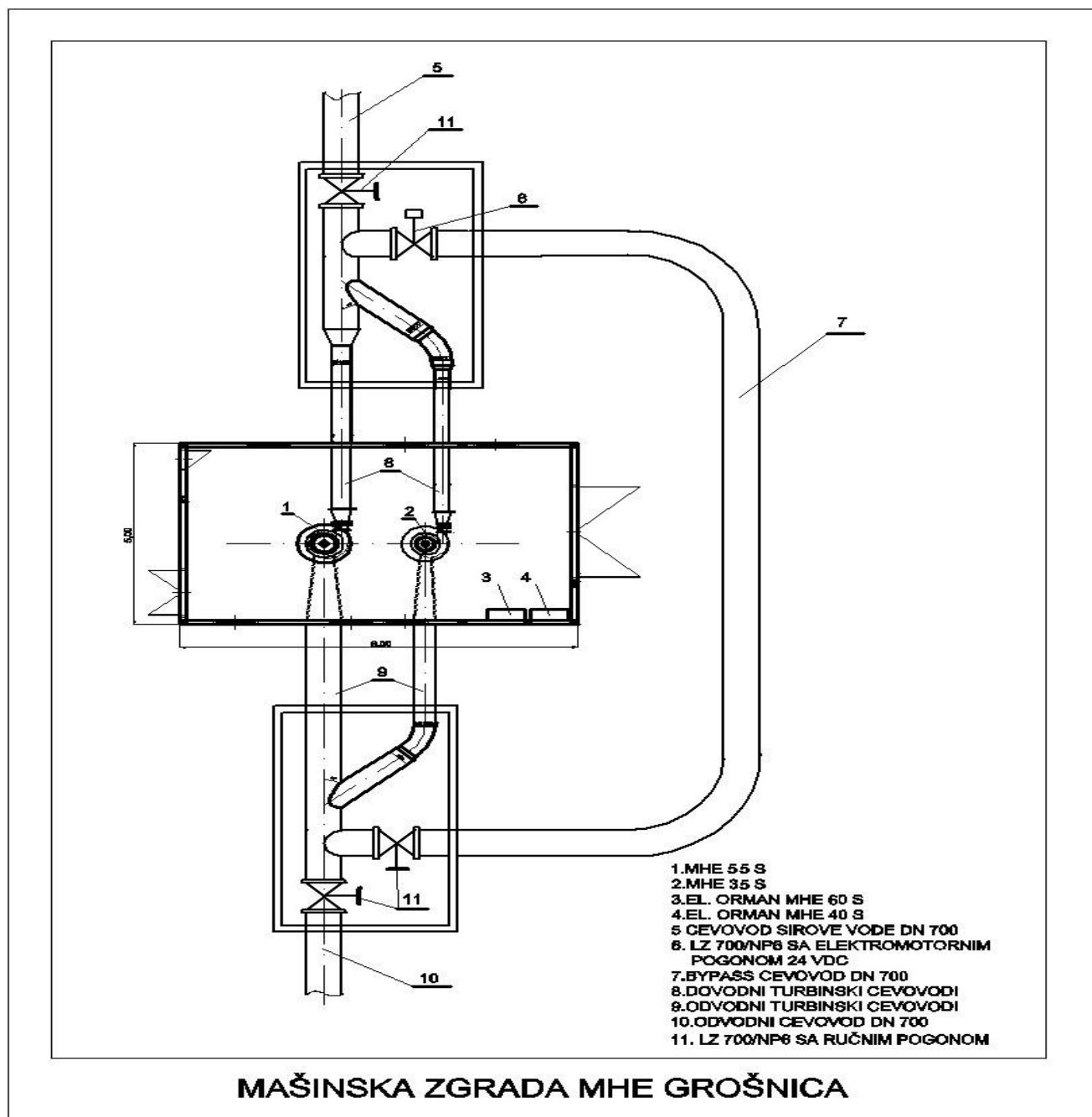
Користећи добијене вредности из табеле 8 и Сliku 39, на којој је представљена уобичајена класификација хидротурбина према оптималној значици специфичног броја обртаја, долазимо до податка да су обе полуаксијалне, Францисове турбине спороходног типа.



Слика 39 Уобичајена класификација хидрауличних турбина према оптималној значајности специфичног броја обртаја n_{sp} у оптималном бруто паду H_{br} [7]

5.5 Идејно решење нове МХЕ на Водојажи

Шема идејног решења нове МХЕ на Водојажи приказано је на слици 40.



Слика 40 Шема нове МХЕ на Водојажи

6.0 Економска анализа

У овом одељку посветићемо се трошковима изградње нове МХЕ Грошница као и њеној економској исплативости. Подаци су преузети од експерта у овој струци, који је затражио да остане анониман.

6.1 Грађевински и хидрограђевински

У табели 9 приказан је прорачун грађевинских и хидрограђевинских трошкова.

Табела 9 Прорачун грађевинских и хидрограђевинских трошкова [€]

Р.бр.	Опис позиције	ј.м.	Количина	Цена €	Износ €
1	Техничка документација и				10.000
2	Ископ, за улазну шахту, кат. 4-8	m ³	90	8	720
3	Шаловање, армирање и бетонирање улазне шахте	m ³	28	100	2.800
4	Набавка материјала, транспорт и изградња објекта за смештај МХЦ	m ²	40	350	14.000
5	Ископ за „bypass“ цевовод, кат. 4-8	m ³	220	8	1.760
6	Набавка, транспорт и уградња цевовода од челика DN 700 / NP6 за „bypass“ цевовод	m	40	150	6.000
7	Набавка, уградња лукова и редукција				2.000
8	Затрпавање „bypass“ цевовода	m ³	204	3	612
9	Ископ, за излазну шахту, кат. 4-8	m ³	90	8	720
10	Шаловање, армирање и бетонирање излазне шахте	m ³	28	100	2.800
Укупно					41.412

6.2 Електро-машинска опрема

У табели 10 дат је прорачун електро-машинске опреме

Табела 10 *Прорачун електро-машинске опреме [€]*

Р.бр.	Опис позиције	ј.м.	Количина	Цена €	Износ €
1	Хидроелектрана МХЦ 55 С -турбина, асинхрони мотор и електро орман	ком	1		40.000
2	Хидроелектрана МХЦ 35 С -турбина, асинхрони мотор и електро орман	ком	1		27.000
3	Ручна једномостна дизалица 1.000 kg – набавка, транспорт и монтажа	ком	1		5.000
4	Набавка, транспорт и монтажа лептирастих затварача LZ 700 NP6 са ручним погоном	ком	3	12.000	36.000
5	Набавка, транспорт и монтажа лептирастих затварача LZ 700 NP6 са електромоторним погоном на 24VDC	ком	1	15.000	15.000
6	Прикључак на ниско напонски део постојеће трафостанице				500
Укупно					123.500

6.3 Рекапитулација

У табели 11 дат је прорачун укупних трошкова.

Табела 11 *Рекапитулација трошкова [€]*

Р.бр.	Врста радова	Износ €
1.	Грађевински и хидрограђевински	41.412
2.	Електро машинска	123.500
Укупно		164.912

Према пронађеним подацима, сазнао сам да, ако су турбине снаге мање од 10 [MW] просечна цена енергије је 10.5 [дин/kWh], а за турбине снаге веће од 10 [MW] просечна цена енергије је 6.11 [дин/kWh] по “feed-in” тарифи. Пошто су обе хидротурбине снаге

мање од 10 [MW], из тога следи да ће МХЕ Грошница производити и продавати електричну енергију по скупљој тарифи (Табела 12).

Табела 12 Прорачун годишње зараде МХЕ Грошница

Произведена енергија	Произведена енергија по времену P [kWh]		Годишња зарада	
P [kW]	дан	година	RSD	EUR
90	2160	788400	8278200	72298.7

Тако да се исплативост пројекта изградње МХЕ Грошница рачуна према обрасцу (55):

$$ПЕРИОД ОТПЛАТЕ = \frac{ТРОШКОВИ}{ИСПЛАТИВОСТ} = \frac{164912}{72298.7} = 2.3 \quad (55)$$

На основу прорачуна видимо да је период исплативости МХЕ Водојажа нешто већи од две године.

7.0 Закључак

Учешће производње електричне енергије у хидроенергетским постројењима у укупној производњи електричне енергије у Србији је за читав ред величине мање од просечног учешћа у Европској Унији, које се убрзано удвостручује. Пораст увозне зависности и цена енергије у Србији дају додатни подстицај генерацији хидро-електричне енергије и рационализацији потрошње примарне енергије уопште, нарочито ако се има у виду и очекивано.

Прихватајући и опредељујући се за ову тему мислио сам да постоје релевантни подаци којима могу једноставно прићи и користити их, да их обрађујем на начин који ми одговара. На самом почетку сам посетио огранак водовода у Грошници, где се налазила стара МХЕ, и тамо сам пронашао доста података. Пронашао сам један документ који је био мало обимнији, али он није био приређен на тај начин, да могу да обрадим податке. Због тога сам велику пажњу посветио тематизацији података до којих сам био у могућности да дођем, оријентација ми је била окренута на то да направим базу података која може, ако то буде дозвољено од стране пословног удружења „ЈКП Водовод и Канализација“ Крагујевац и других одговорних лица да буде доступна „online“, то јест на интернету. Тиме сам дошао до концепта који је приказан у овом раду.

На основу урађеног пројекта и економске анализе дошао сам до периода отплате МХЕ Водојажа који износи око 2 године. Закључујем да је период отплате релативно мали у односу на век трајања хидро-генерационог постројења, и да је потребно увести што је већи број могућих хидроенергетских постројења на местима где је то могуће.

8.0 Литература

- [1] <http://sr.wikipedia.org/wiki/Енергија>
- [2] http://sr.wikipedia.org/wiki/Електрична_енергија
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Dam>
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_generator
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Water_purification#Rapid_sand_filters
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Water_turbine
- [7] „ТУРБОМАШИНЕ – теорија и математичко моделирање“ Проф. Др. [Милун Ј. Бабић](#),
Проф. Др. Светислав Стојковић
- [8] http://sr.wikipedia.org/wiki/Грошничко_језеро
- [9] „ГРОШНИЦА У ПРОШЛОСТИ (хроника села)“ Јакша Бошковић
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Arch-gravity_dam
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Rapid_sand_filter
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine
- [13] „МАЛЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ У ЕУРОПИ: приручник о потребним административним
поступцима“ Проф. др. сц. Звонимир Гузовић
- [14] <http://en.wikipedia.org/wiki/Voith>
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
- [16] <http://en.wikipedia.org/wiki/Limescale>
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Hard_water
- [18] „Отворени асинхрони мотори АТБ Север Суботица“ каталог за одабир електричних
генератора