

# Modeliranje i upravljanje hidroelektranama

---

Ćosić, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2016

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:377519>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**MODELIRANJE I UPRAVLJANJE  
HIDROELEKTRANAMA**

**Diplomski rad**

**Krešimir Ćosić**

**Osijek, 2016.**

**ETFOS**

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek,

**Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Krešimir Čosić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, elektroneretika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-728, 2013.
<b>Mentor:</b>	Prof. dr. sc. Zoran Baus
<b>Sumentor:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	
<b>Član Povjerenstva:</b>	
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Modeliranje i upravljanje hidroelektranama
<b>Primarna znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika</b>
<b>Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:</b>	<b>Elektrotehnika</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U radu je potrebno opisati sustav upravljanja hidroelektranom za različite modele upravljanja. Opisati svojstva hidrauličkih i hidroenergetskih postrojenja za različite režime rada. Analizirati podsustave upravljanja hidroagregatima, kao što su ( $P-f$ ) sustav i ( $Q-V$ ) sustav upravljanja. Razmatrati stabilnost sustava u ovisnosti o efikasnosti sustava upravljanja. Analizirati rad regulatora i referentnih modela upravljanja s hidroagregatima.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: Jasnoća pismenog izražavanja: Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:

Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku,                      godine

Potpis predsjednika Odbora:



**ETFOS**  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

**Ime i prezime studenta:**

Krešimir Ćosić

**Studij :**

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-728, 2013.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

Modeliranje i upravljanje hidroelektranama

izrađen pod vodstvom mentora

**Prof. dr. sc. Zorana Bausa**

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.  
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak rada .....	1
2. HIDRO-ENERGIJA .....	2
2.1. Povijest hidro-energije .....	2
2.2. Električna energija iz snage vode .....	4
2.3. Povijest upravljanja tokom .....	6
2.4. Kontrola električne mreže .....	8
2.5. Ekonomičnost hidroelektrana .....	10
2.6. Budućnost hidro – energije .....	12
3. MODELIRANJE ELEKTRANE .....	16
3.1. Model turbine .....	16
3.1.1. Impulsne turbine .....	16
3.1.2. Reackijske turbine .....	17
3.1.3. Rad turbine .....	18
3.2. Model vodenog stupa .....	20
3.2.1. Jedno-dovodni model .....	20
3.2.2. Elastičnost vode .....	22
3.2.3. Kontrola tlaka .....	23
3.2.4. Model kompenzacijskog bazena .....	24
3.3. Mehanički model generatora .....	24
3.4. Model hidroelektrane u Brazilu .....	26
3.4.1. Vrijednosti zadanog sustava .....	29
4. SUSTAV UPRAVLJANJA .....	34
4.1. Megawatt – frekvencija upravljanje ( $P - f$ upravljanje) .....	34
4.2. Megavar – napon upravljanje ( $Q - V$ upravljanje) .....	35

4.3. Upravljanje frekvencijom tereta.....	35
4.4. Osnovne petlje upravljanja.....	36
4.5. Metode predviđanja.....	38
5. ANALIZA UPRAVLJANJA .....	39
5.1. Analiza regulacije HE <i>Dinorwig</i> .....	39
5.1.2. PI regulator unutar <i>Dinorwiga</i> .....	45
5.2. Analiza regulacije izolirane HE u Brazilu.....	46
6. ZAKLJUČAK .....	53
LITERATURA.....	54
SAŽETAK.....	55
ABSTRACT .....	55
ŽIVOTOPIS .....	56

# 1. UVOD

Obnovljivi izvori energije su postali veoma bitan čimbenik u životu čovjeka. Razvojem raznih tehnologija i pionirskih procedura, takva energija je postala pristupačnija sada nego ikada prije. Do njenog razvoja dolazi zbog raznih zakonitosti o čistoći okoliša, straha od nedostatka fosilnih goriva (o kojima je čovjek donedavno potpuno ovisio) i slično.

Jedan od najvećih izvora električne energije u svijetu danas je hidro – energija. Ideja o pretvaranju kinetičke energije vode u druge oblike, uključujući električnu, se ispostavila kao najveći korak u evoluciji čovjeka kao svjesnog bića koje brine za okoliš.

## 1.1. Zadatak rada

U ovome radu, uz kratku povijest hidroelektrana, obratit će se pažnja na modeliranje hidroelektrane te će se vidjeti kakvi različiti modeli upravljanja se mogu upotrijebiti u raznim prilikama. Naknadno će se opisati svojstva hidrauličkih i hidroenergetskih postrojenja za različite režime rada; analizirati podsustave upravljanja hidroagregatima, poput ( $P-f$ ) sustav i ( $Q-V$ ) sustav upravljanja.

Nadalje, razmatra se stabilnost sustava u ovisnosti o efikasnosti sustava upravljanja; analizira se rad regulatora i referentnih modela upravljanja s hidroagregatima.

Povodom demonstracije regulacija, koristi se programski paket *MatLAB* i *Simulink*, radi što slikovitijeg prikaza učinaka različitih tipova regulatora na rad i sustav hidroelektrane.

## 2. HIDRO-ENERGIJA

Usprkos tome što je hidro – energija danas veoma značajan čimbenik u razvoju čovječanstva i stvaranju energije, već davnih dana ljudi su koristili kinetičku energiju vode u raznim situacijama, poput mlinovi za mljevenje žita te u novije vrijeme u strojevima tekstilne industrije. Također, vodeni kotači su se koristili za uzdizanje vode povodom sustava navodnjavanja.

### 2.1. Povijest hidro-energije

Vrhunac stare tehnologije korištenja vode je „*Lady Isabella*“ (Sl. 2.1.) u Laxey, Isle of Man; predstavlja najveću funkcionirajuću instalaciju ovakvog tipa na svijetu (2-3 o/min, 150 kW). Nažalost, efikasnost ovakvih vodenih kotača je ograničena, te je maksimalna teoretska iskoristivost 63%; istraženo od strane *John Smeatona*, 1759.



Sl. 2.1. „*Lady Isabella*“, Laxey, Isle of Man. [1]

Tek 1827. godine dolazi do revolucije dizajna, koje predstavlja *Fourneyron*. Reakcijska turbina snage 4.5 kW, imala je dva seta lopatica zakrenutih u suprotnim smjerovima. Taj stroj je mogao raditi od 2000 do 3000 o/min, bio je fizički malen, imao je mogućnost rada na velikom protoku vode te je dostigao efikasnost od 80% do 85%. Nadalje, poboljšanja *Fourneyronove* turbine te



bolje razumijevanje mehanizma tekućina dovodi *Lazare Carnota* i *Jean Charles de Borda* do jednadžbe dinamike fluida, što odgovara gubicima energije zbog nagle promjene u brzini tekućine, npr. kontrakcija ili ekspanzija unutar cijevi.

$$\Delta E = \frac{1}{2} \xi \rho (v_1 - v_2) \quad (2-1)$$

gdje su:

- $\rho$  - gustoća vode,
- $\xi$  - empirijski određen faktor gubitaka ( $0 \leq \xi \leq 1$ ),
- $v_1, v_2$  - brzine prije i nakon ekspanzije ( $v_1 > v_2$ ).

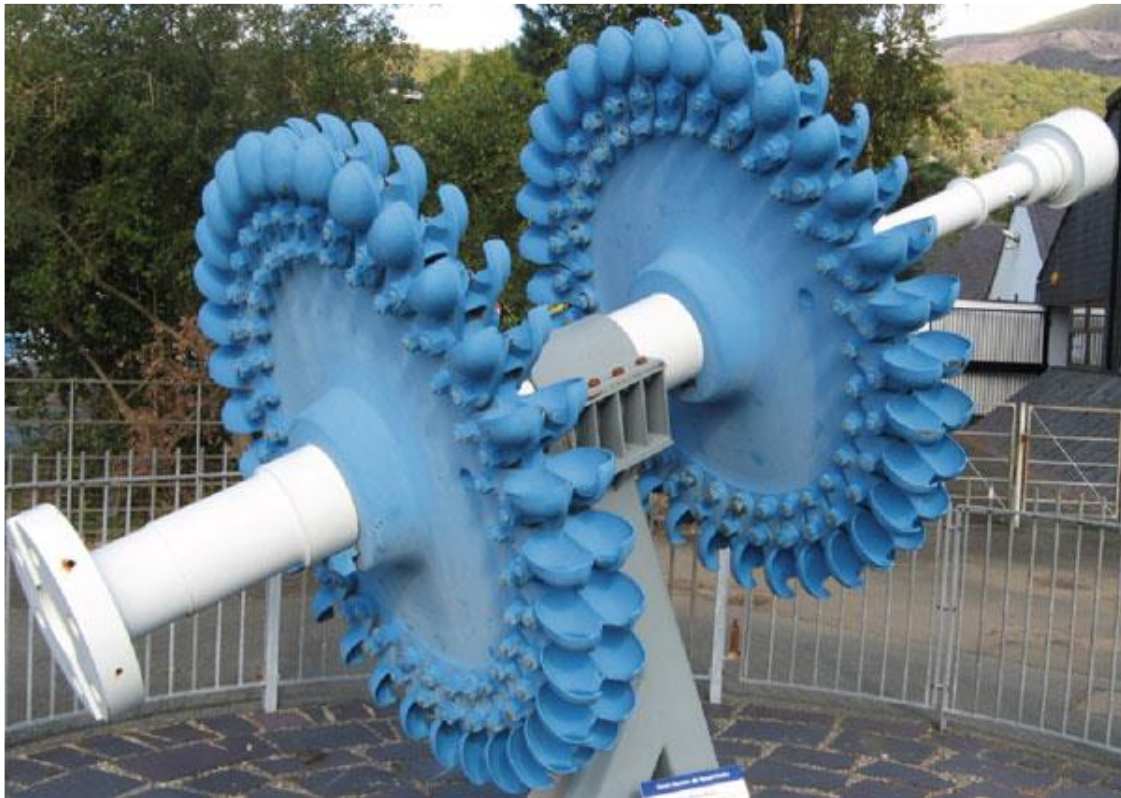
Ova formula govori o gubicima energije tijekom promjene u brzini tekućine, te se smanjenjem tih promjena mogu smanjiti i gubici. *Uriah Boyden* iz SAD-a, između 1840. i 1850. je donio znatne promjene uzimajući u obzir put vode kroz turbinu, to jest pojednostavio je razmišljanje o istom, modificirajući geometriju turbine da hidraulički gubici uzrokovani trenjem i neslojevitim tokom vode se naveliko smanje. Blisko je surađivao sa *Francisom* te su zajedno došli do problema starih turbina. 1849. godine *Francis* unaprjeđuje stare turbine te samim time nastaje svjetski poznata i daleko najraširenija turbina danas; *Francisova* turbina (Sl. 2.2.).



Sl. 2.2. *Francisova* turbina [1]

Slična *Francisovoj* turbini je *Kaplanova*, kod koje se nagib lopatica može kontrolirati. Često se koriste gdje je moguć velik tok vode i gdje visina vode mora biti malena.

Tijekom zlatne groznice u SAD-u, *Samuel Knight* je kontrolirao usmjereni mlaz vode na kantice postavljene na rubu kotača, te je taj mlaz tangencijalno udarao po kanticama. Time je kinetička energija vode pretvorena u mehaničku, jer je sila kojom voda udara o kantice davala moment kotaču te ga pokretala. Ogromne napretke tom izdanju turbinu je dao *Pelton*, koji je poredao dvoslojne lopatice u polukružnom profilu, koji blago mijenja smjer mlaza vode na bilo koju stranu uz minimalne gubitke (Sl. 2.3.).



Sl. 2.3. Peltonova turbina (1MW). [1]

Sredinom 1970 – tih, vizija o hidroelektranama je stvorena iz rasta konkurencije drugih izvora električne energije. Problem kod projiciranih malenih hidroelektrana je bio velik trošak za održavanje, sa usporedbom kod klasičnih fosilnih elektrana. Stoga, razvoj hidroelektrana je ovisio o veličini, jer se isplativost veličinom povećavala. Ta situacija se kasnije promijenila, te su hidroelektrane manjih dimenzija postale poželjna investicija.

## 2.2. Električna energija iz snage vode

Jedan od najvećih pogodnosti ovakvog tipa generiranja električne energije dolazi iz mogućnosti ostvarivanja takvog pothvata u najgorim uvjetima, planine, rijeke, mora i jezera. Najčešće nenaseljeni dijelovi kopna, sa puno prostora koje se može iskoristiti za opskrbu susjednih gradova

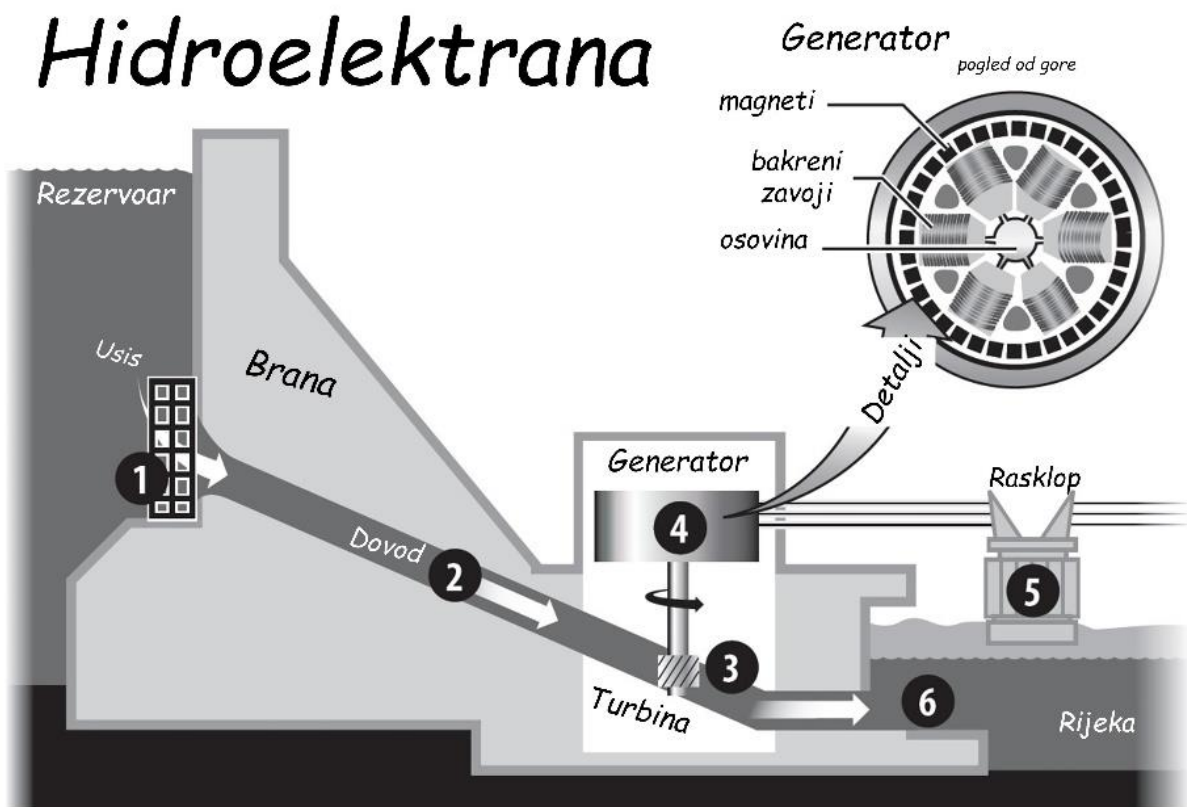
gdje se električna energija može iskoristiti. Činjenica da u Norveškoj 2008. godine 98.5% sve električne energije dolazi iz ovakvih izvora govori o snazi i dostupnosti hidroelektrana.

Teško je odrediti gdje je bio početak pretvorbe hidro-energije u električnu, ali se može reći da *Sir William Armstrong*, industrijalist iz Engleske, je bio među prvima koji je to iskoristio; upalio je svjetiljku u svojoj galeriji umjetnosti.

Naveliko je prihvaćeno da je električna energija iz hidroelektrana (Sl. 2.4.) čista, efikasna i pouzdan izvor energije. Iako ljudsko miješanje u prirodu ovakvog tipa nije neprimijećeno, daleko je manji zagađivač od fosilnih goriva. Paralelno tome, veliki je pionir u tehnologiji obrane od poplava i stabilizaciji opskrbe vode.

Ipak, hidroelektrane velikih dimenzija imaju svoje nedostatke:

- Osiguravanje velikih bazena, često dovodi do premještanja većeg broja bližnjih stanovnika; što dovodi do pobuna ukoliko kompenzacija nije adekvatna.
- Okoliš je pogododan, ekosustav flore i faune dovodi do nereda.
- Tok vode se može mijenjati, što u slučaju granica država može dovesti do nepovoljnih situacija.

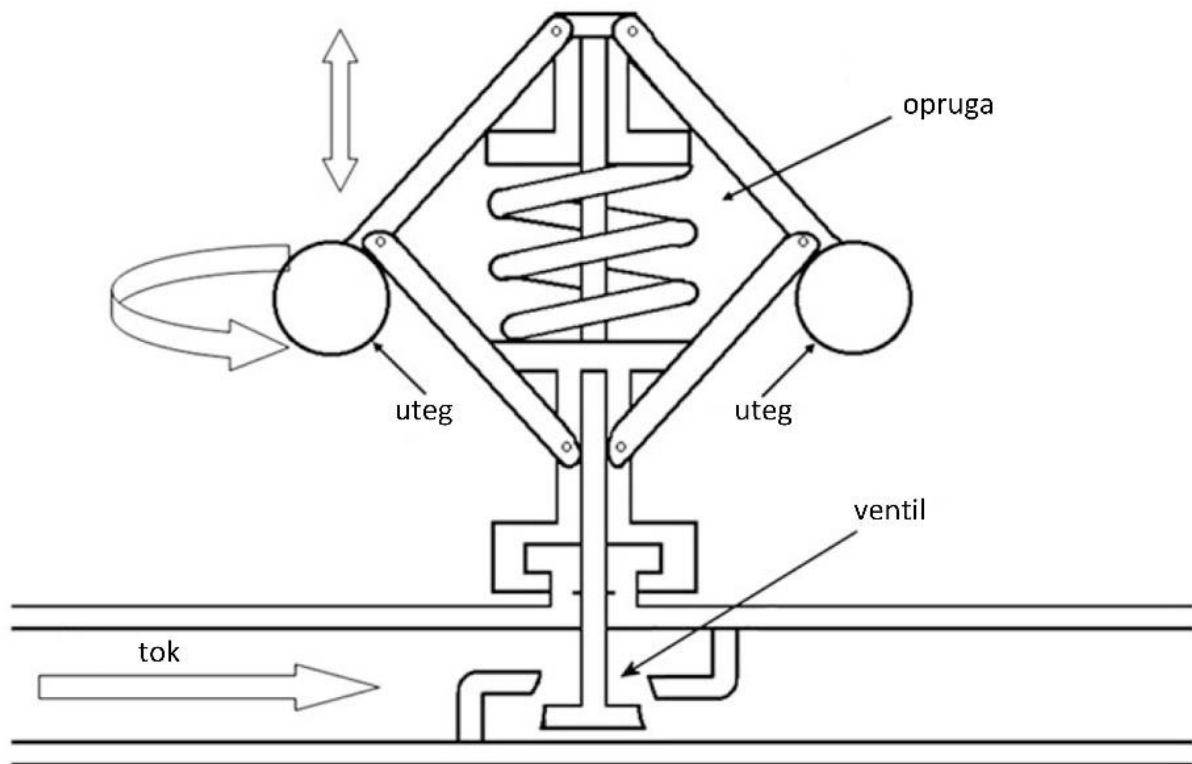


Sl. 2.4. Općeniti prikaz načina iskorištavanja snage vode. [2]

Kada su ovi problemi riješeni, dovodi se pitanje isplativosti. Konstrukcije ovakvih hidroelektrana imaju veliku cijenu i imaju tendenciju da gradnja istih traje do nekoliko godina. Uz početne minuse kompezacije bližnjih stanovnika (ako ih ima), te velikog početnog kapitala, isplativost ovakve elektrane za investitore zna potrajati.

### 2.3. Povijest upravljanja tokom

Jedna od najkorištenijih starih mehanički zasnovanih načina upravljanja tokom vode je centrifugalni kontroler (Sl. 2.5.). Imao je kotur, odnosno postolje, dugačko vratilo, dva utega, dvije radne ruke na kojima su ti utezi postavljeni, cilindričnu ogrlicu te pločicu ili disk koji drži te ruke prilikom bezposlenog rada.



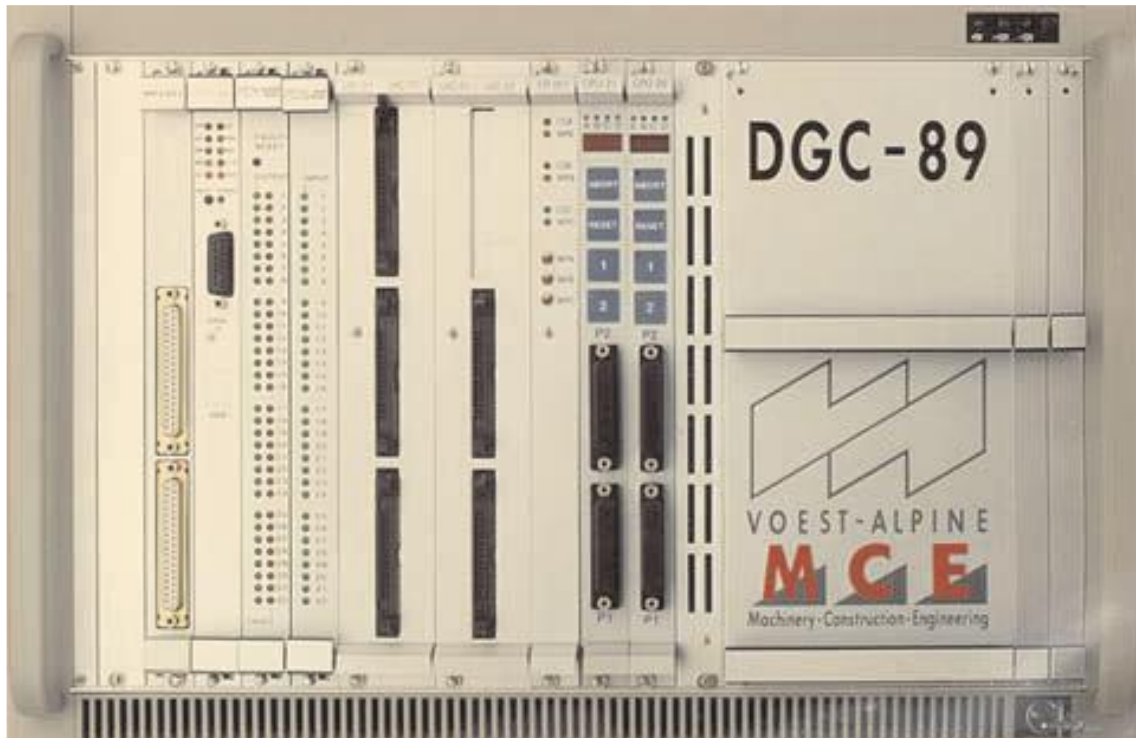
Sl. 2.5. Centrifugalni upravljač. [1]

Prilikom manjeg tereta, ventil koji pušta vodu se okreće okomito na tok vode, te blokira protok. Centrifugalne sile prilikom vrtnje dvaju utega drže cilindričnu ogrlicu u istom položaju, te se utezi vrte većom kružnom brzinom. Nasuprot tome, prilikom većeg tereta potrebnog, ventil propušta vodu te se utezi spuštaju u početni položaj te se vrte malenom brzinom. Taj ventil je spojen mehanički na cilindričnu ogrlicu koja ima mogućnost gibanja po vratilu.

Puno vremena prolazi do trenutka kada se klasični mehanički upravljači mijenjaju sa sljedećom generacijom, odnosno električnim upravljačima. Njih je karakteriziralo kratko prijelazno

razdoblje, odnosno manji utjecaj promjena u sustavu na izlazni rezultat. Njihov dolazak je označio kraj mehaničkih upravljača. Kondenzatori, otpornici i zavojnice su omogućavali raznolike rezultate u kombinaciji sa pojačalima i tranzistorima. Ipak ova druga generacija upravljača je i dalje imala neke mane starih, potpuno nepromjenjiva struktura radnji PI i PID regulatora.

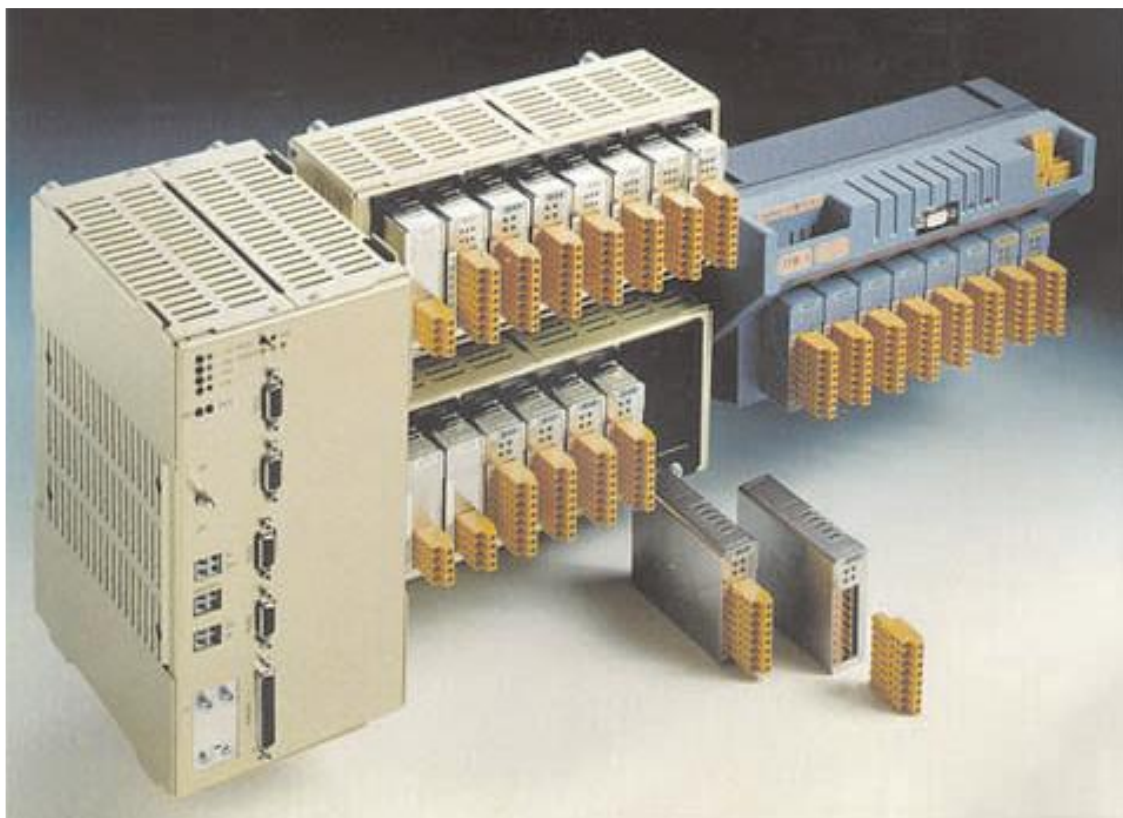
Treća generacija su bili kompaktni multiprocesorski upravljači (Sl. 2.6.). Dizajnirani za sve vrste zatvorenih i otvorenih petlji te njihovo nadgledanje, predstavljali su veliki skok.



Sl. 2.6. Digitalni upravljač *DGC-89* od *Voest-Alpine M.C.E.*, Linz, Austrija, 1989. (fotografija zaslugom *VOEST* – a). [3]

Najveća razlika je bila mogućnost modificiranja blokovskih dijagrama na čijem principu je ovakav upravljač i radio. Rad povezanog uređaja se mogao prilagoditi, promijeniti ukoliko je bilo potrebno. Programiranje je vršeno na računalu, kao što je prisutno i danas.

Najnoviji razvici danas u ovome području su sofisticirani sistemi koji omogućuju nekoliko dodatnih funkcija; određivanje optimalnog odnosa između položaja vrata i nagiba lopatica turbina poput Kaplanove (Sl. 2.7.).



Sl. 2.7. Sustav kontrole turbine *DTL 595* od *Sulzer Escher Wyss*, Zurich, 1998. (fotografija zaslugom *Sulzer Escher Wyss* – a). [3]

Nadalje omogućava i procesiranje raznih varijabli poput temperature te se preko sabirnice optičkog kabela vrši kontrola, nadgledanje i automatizacija sustava.

## 2.4. Kontrola električne mreže

Posebne karakteristike hidroelektrana postala su veoma bitan faktor u kontroli mreže. Sa svojim posebnostima, hidroelektrane imaju mogućnost da budu regularan izvor električne energije, te da budu rezerva u slučaju nepogodnih situacija. Rezerva je predstavljena 1882. godine te je bazirana na iskorištavanju energije kad god je potrebna, a kada nije skladištenju iste. Ideja je skladištiti energiju proizvedenu tijekom večeri, kada je teret malen te koristiti ju kada je teret velik tijekom dana. Voda se pumpa u veliki rezervoar prilikom malog tereta, te se prazni kada je zahtjev za energijom velik. Ovakav proces ima troškove, ali su dovoljno maleni u usporedbi sa "jeftinijom" varijantom davanja energije kada je potrebna.

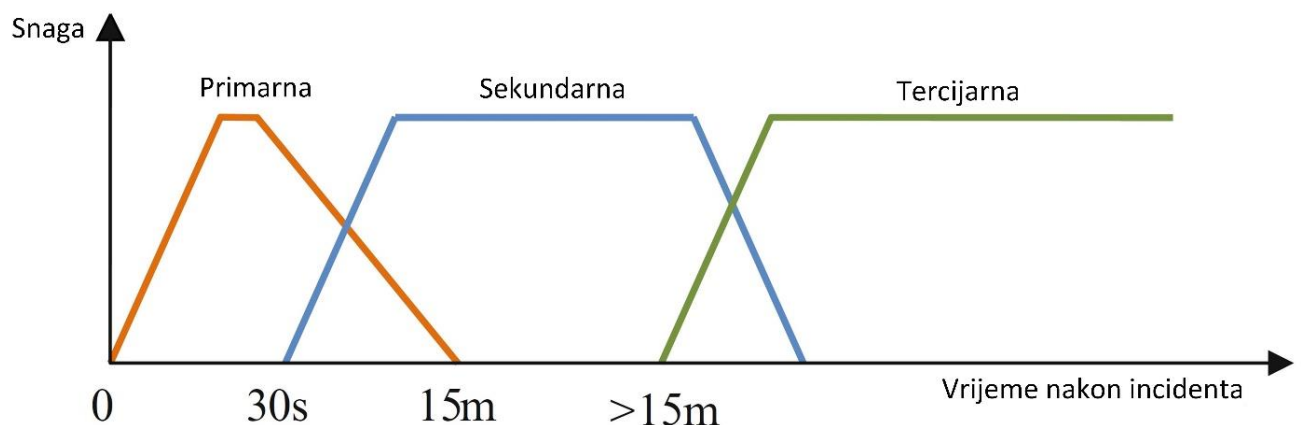
Hidroelektrane imaju veoma brz odaziv, te im izlazna snaga može varirati između nula i punog tereta u roku od nekoliko minuta, u nekim slučajevima čak i sekundama. Zbog takvog brzog

odaziva imaju jedinstvenu ulogu u kontroli mreže prilikom naglih promjena zahtjeva za električnom energijom.

Zbog raznih rizika i poremećaja u mreži uvijek mora postojati rezerva. Razina rezerve se postavlja prema kapacitetu odnosno snazi najveće elektrane. Zbog nagle promjene u proizvodnji električne energije ili puno rjeđe zbog naglog povećanja tereta na mreži mora postojati dovoljan broj funkcionalnih rezervi u pripremi. Postoje dva tipa rezervi:

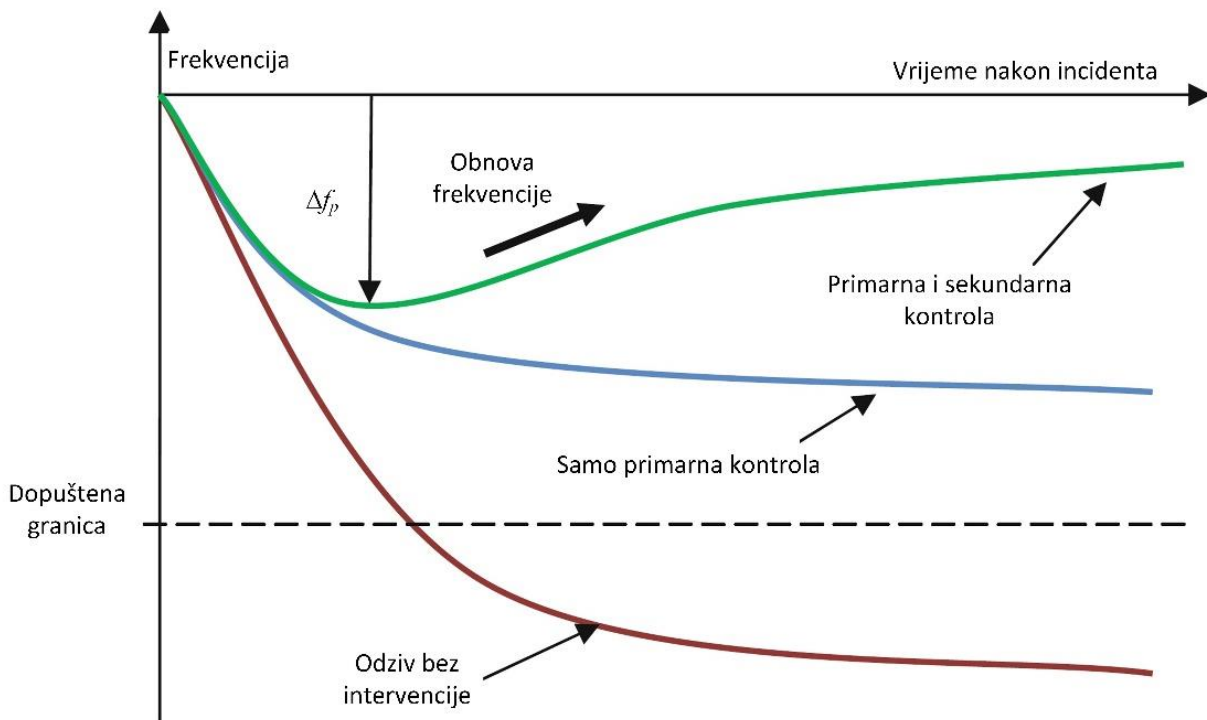
- Rezerva u sinkronizmu sa mrežom, čiji generatori ne proizvode aktivnu snagu ali su spremni za rad u trenutku potrebe
- Rezerva brzog pokretanja, čiji generatori su u mirovanju ali se velikom brzinom mogu sinkronizirati na mrežu

Odaziv mreže na velike i brze devijacije frekvencije se rješava u tri etape; primarnom, sekundarnom i tercijarnom kontrolom (Sl. 2.8.).



Sl. 2.8. Etape odaziva prilikom nagle promjene frekvencije. [1]

Primarna kontrola se vrši do 30 – ak sekundi, da sekundarna kontrola stigne nastupiti. Nakon završetka, sudionici primarne kontrole se vraćaju u rezervu. Kada su sekundarni generatori vratili frekvenciju na prihvatljivu razinu i oni se skidaju sa mreže te nastupa osnovna generacija. Mreža je u tom trenutku zasnovana na novoj operacijskoj točki. Ova strategija ima zadani profil frekvencije koji želi dostići (Sl. 2.9.).  $\Delta f_p$  predstavlja vršnu devijaciju frekvencije.



Sl. 2.9. Profil kontrole frekvencije. [1]

## 2.5. Ekonomičnost hidroelektrana

Po pitanju isplativosti hidroelektrana, imaju specifična obilježja. Imaju velike inicijalne troškove te se isplativost može dobiti tek nakon nekog vremena. Hidroelektrane pridonose 16% globalne proizvodnje električne energije te im je poželjnost velika. Trenutno tehnički potencijal HE je pet puta veći nego što se trenutno koristi, te u zemljama u razvoju imaju velike mogućnosti.

Prema istraživanjima *U.S. Energy Information Administration*, hidro – energija pridonosi otprilike 16400 TWh/god, te se do 2050. projicira da će se ta vrijednost udvostručiti. HE uz velik početni kapital donose i neke pogodnosti, rukovanje i troškovi nakon završetka su veoma beznačajni u usporedbi sa drugim oblicima energije. Životni vijek se očekuje od 40 do 50 godina, a uz renovacije se taj vijek može i produžiti do 100 godina. Koristi ne nekoliko profila tijekom poslovanja električnom energije prema Sl. 2.10.

Tijekom godina iskustva došlo je do zaključka koliko kW može vrijediti investitorima. Manje elektrane zahtijevaju više novaca po kW; od \$1300/kW do čak \$8000/kW. Tipične vrijednosti, iako variraju zbog geografskog položaja i mogućih problema prilikom izgradnje su zadani prema Tab 2.1.

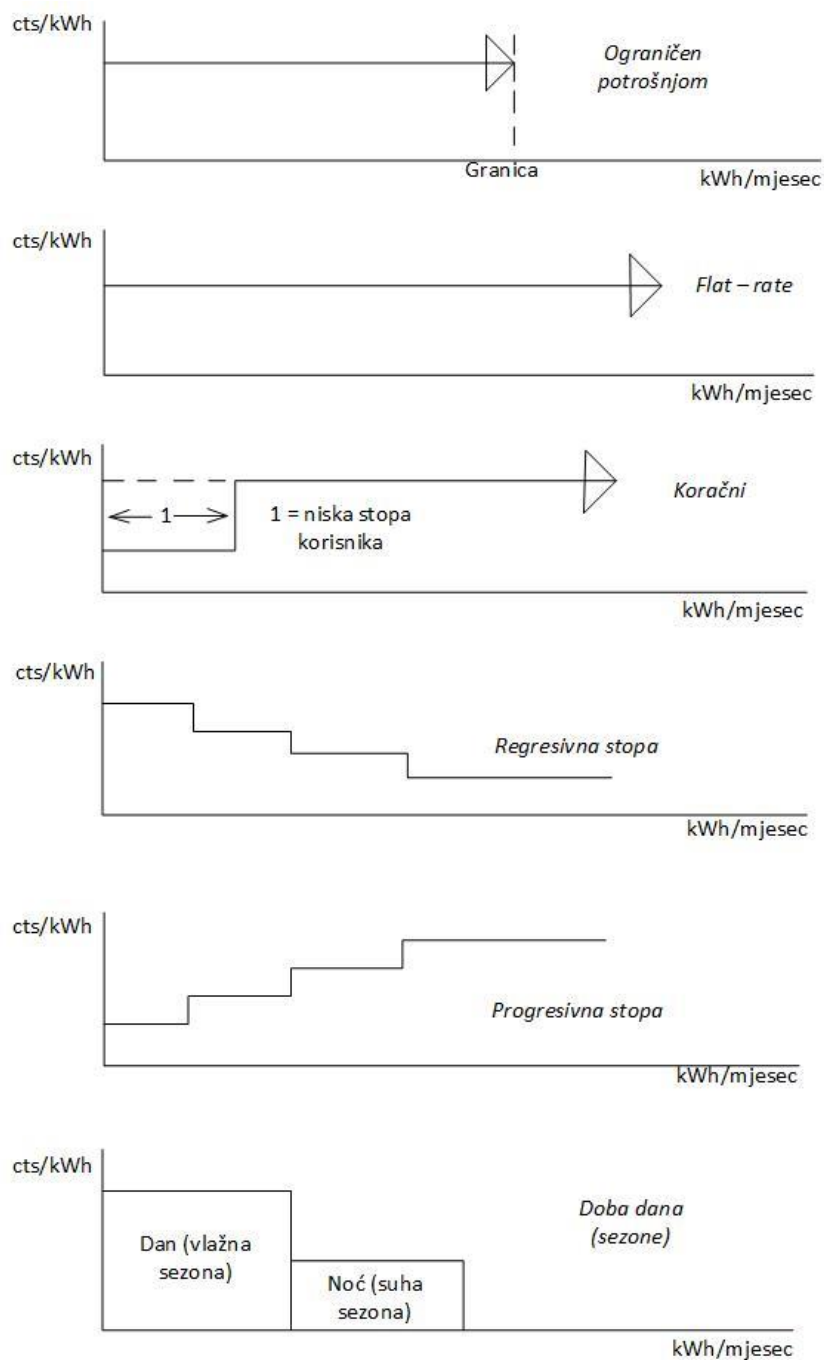


Tipične hidroelektrane				
Tehnologija	Cijena gradnje [\$/kW]	Održavanje [%/cijena u godini izgradnje]	Faktor kapaciteta [%]	Niveliran trošak električne energije [\$/kWh]
Velike HE	1050 – 7650	2 – 2.5	25 – 90	0.02 – 0.19
Male HE	1300 – 8000	1 – 4	20 – 95	0.02 – 0.27
Nadogradnja Renovacije	500 – 1000	1 – 6		0.01 – 0.05

Tab. 2.1. Tipične cijene izgradnje instalacija i održavanja hidroelektrana. [4]

Financijska analiza proučava potencijalnu profitabilnost za investitore. Profitabilan projekt mora imati isti ili veći povrat uloženog novca. Analiza ovog tipa se zasniva na:

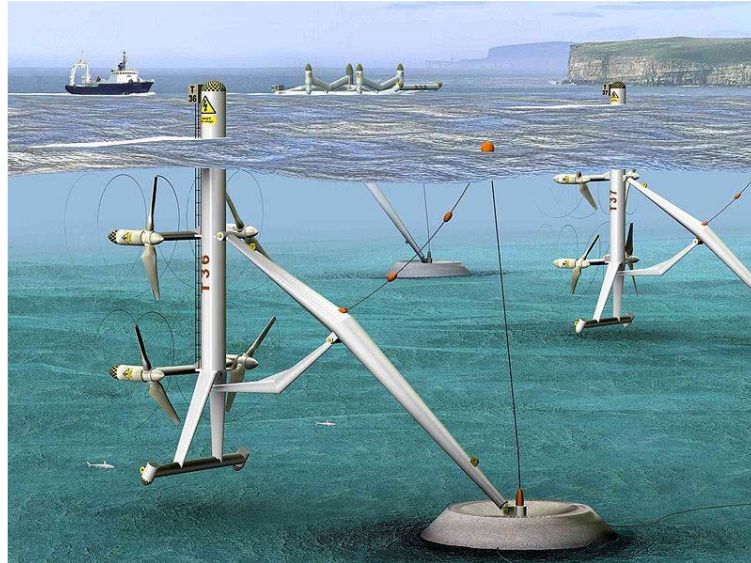
- Hidrologija – Porizvodnja snage ovisi o protoku, na kojeg utječu vremenske prilike i sezonske varijacije. Analogno tome prihodi su varijabilni.
- Hidro – energija ima veliku potrošnju od početka do kraja gradnje, te sama gradnja može biti veoma opasna. Doduše, životni vijek je veoma dug i trošak rukovanja je malen.
- Financijsko stanje hidroelektrana nije osjetljivo na mijenjanje cijena goriva jer ga ne koriste.



Sl. 2.10. Najčešće korištene tarife/modeli tržišta električne energije. [5]

## 2.6. Budućnost hidro – energije

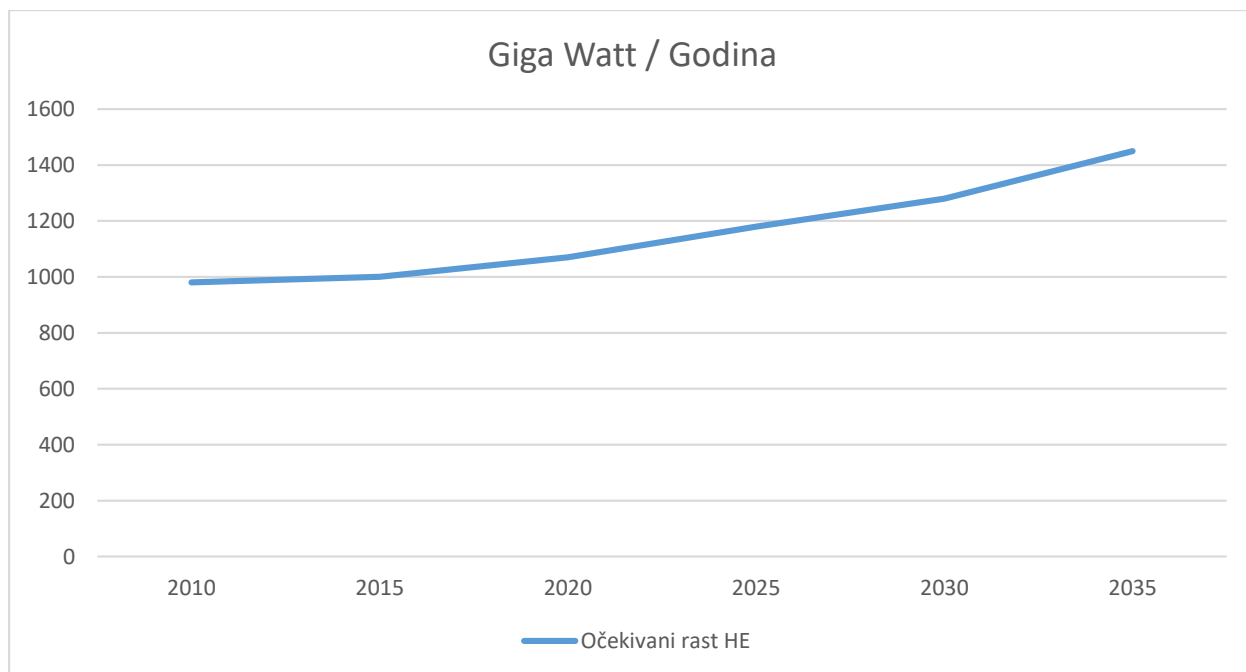
Povodom projiciranja budućnosti postoje razna pitanja. Može li hidro – energija zamijeniti fosilna goriva? Je li pri financijski dostupna? Kako utječe na okoliš? Mogu li se oceani (Sl .2.11.) smatrati kao veliki pridonos hidro – energiji?



Sl. 2.11. Uvid u plimske turbine sa različitim potporima. [6]

1992. godine, kineska vlada je odobrila gradnju hidroelektrane na rijeci Yangtze. Gradnja je tada i dosada ostala kao jedan od najvećih inženjerskih pothvata u povijesti. Prilikom završetka je hidroelektrana dugačka 2330 m, skoro 200 m visoka te je zahtijevala skoro 30 milijuna kubičnih metara betona. Često se govori kako je sama građevina osmo čudo svijeta.

Hidroelektrana imena *Three Gorges Dam* je stvorena radi ogromnog rasta populacije i potražnje energije u Kini. Tek 2006. godine dolazi u pogon, pa čak i do 2012. godine se smatra da službeno cijeli pothvat još nije potpuno završen, što je dva desetljeća poslije početka. Ovo je samo primjer koliko hidroelektrane mogu zahtijevati posla i gradnje prije nego li uopće počnu vraćati uloženi novac.



Sl. 2.12. Očekivana iskoristivost hidro – energije u narednim godinama. [7]

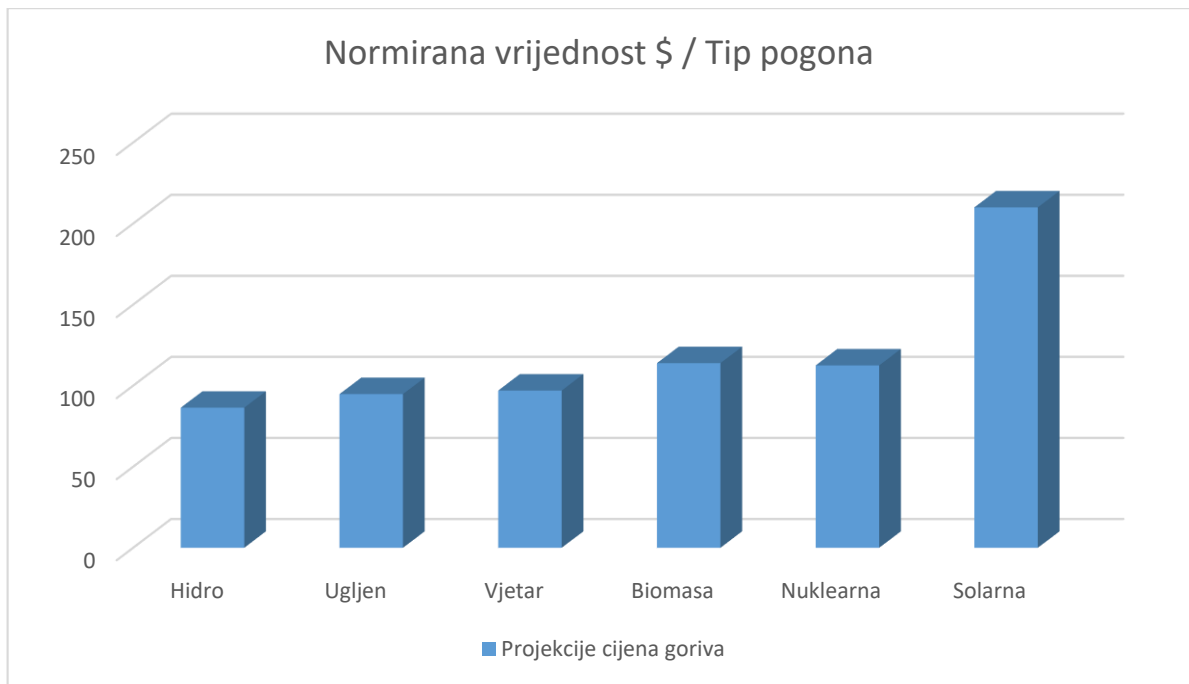
Iako je teško u detalje odrediti koliko energije se može proizvesti u hidroelektranama, jer ovisi o razinama vode, učinkovitosti turbina i sličnim faktorima. Malene hidroelektrane imaju kapacitet ili snagu od 10 do 20 MW. Velike, poput *Grand Coulee Dam* na rijeci Columbiji u Washingtonu (najveća hidroelektrana u SAD-u), imaju snagu do 6000 MW. Ipak pored *Three Gorges Dam* ni to se ne čini mnogo, koja daje do čak 20000 MW. U planu je da samo ova hidroelektrana daje dovoljno energije za čak 20 milijuna kućanstava.

Pri usporedbi sa ostalih izvorima energije poput fosilnih goriva, hidro – energija je glavni natjecatelj sa strane obnovljivih izvora energije. Niti jedan od obnovljivih izvora energije nije trenutno ni blizu iskoristivosti i isplativosti poput energije koju nam daje voda.

Trenutno energija vode ima veliki potencijal (Sl. 2.12.), veoma malen broj rijeka i voda je iskorišten. Od samog primjera rijeke Yangtze i same veličine hidroelektrane na njoj, danas u Kini hidro – energija pridonosi manje od 20% ukupne proizvodnje energije.

Uvijek postoje problemi, činjenica je da neke zemlje jednostavno nemaju potencijala za razvoj hidro – energije, ali postoje mnoge koje imaju. Uspjeh projekta u Kini je probudio ideje mnogih ljudi i investitora, te je u planu u republici Congo napraviti hidroelektranu koja će imati snagu od 39000 MW, što je gotovo duplo više od one u Kini.

Od svih obnovljivih izvora, hidro – energija je najjeftinija (Sl. 2.13.). Ovakva usporedba se provodi uz normiranu vrijednost novca i snage kako bi poredba bila što vjerodostojnija.

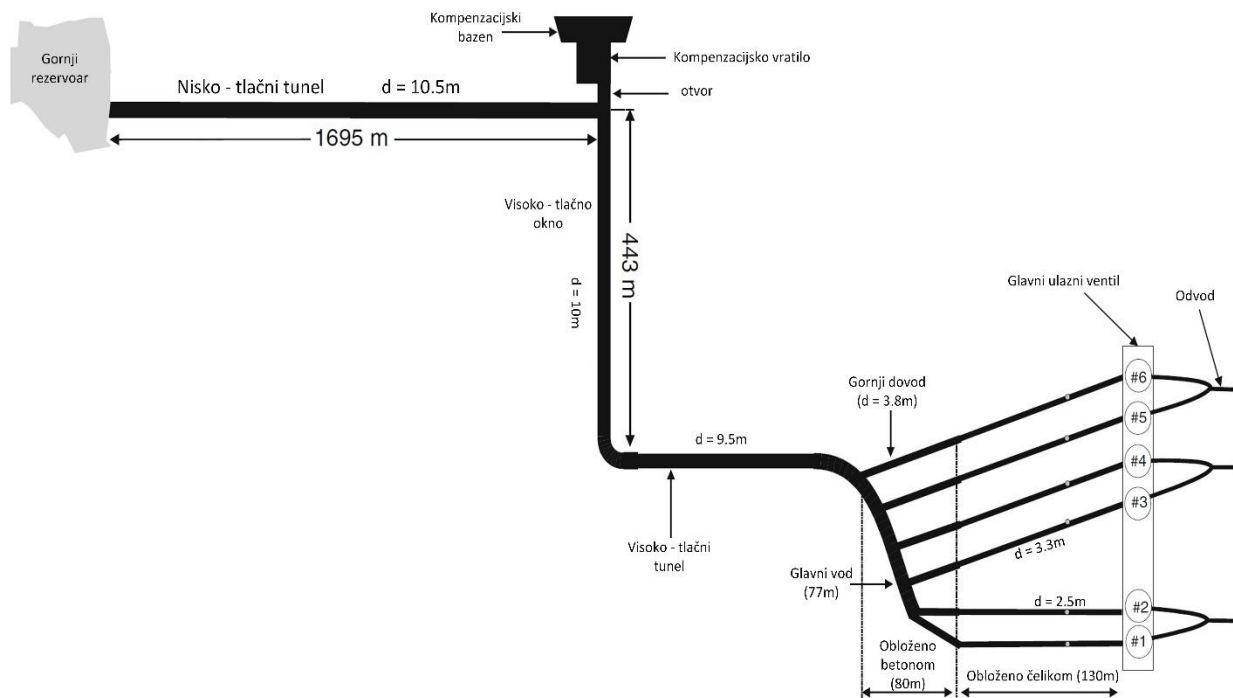


Sl. 2.13. Usporedba cijena načina pogona elektrana. [7]

Budućnost hidro – energije je velika, s puno potencijala i mogućnosti. Stvarat će radna mjesta, olakšavati život, smanjiti zagađenje okoliša. Iako ima svoje mane, prednosti su prevelike da bi se propustile.

### 3. MODELIRANJE ELEKTRANE

Modeliranje ovakvih kompliciranih sustava (Sl. 3.1.) koji se dan danas unaprjeđuju je od vrhunske važnosti. Najčešće modeli sadrže zakonitosti koji utječu na rad sustava, a to su stišljivost vode, elastičnost stijenki dovoda, inercija vode i slično.



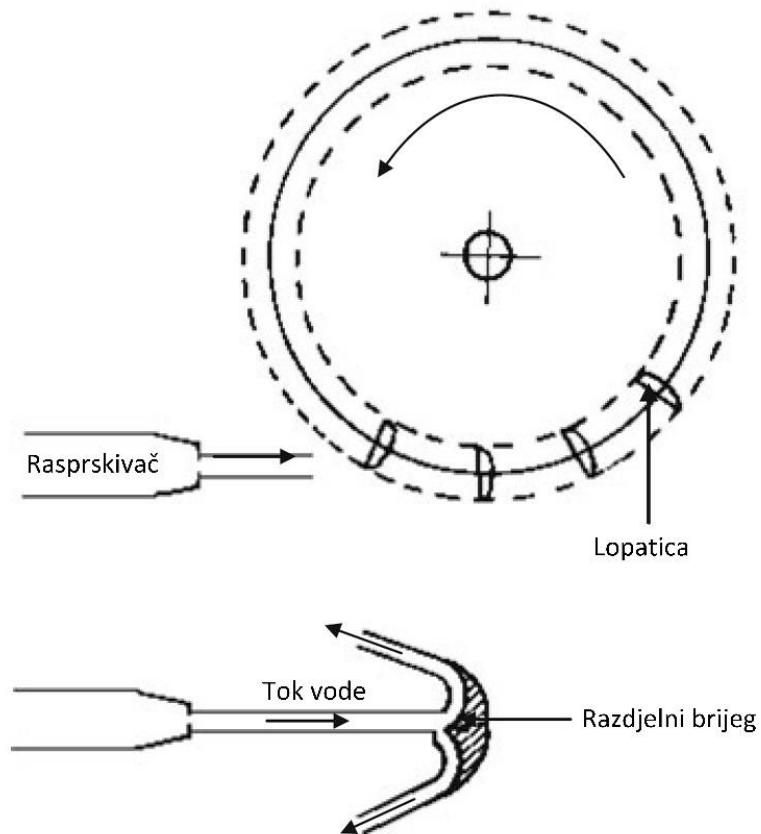
Sl. 3.1. Hidraulički sustav *Dinorwig* hidroelektrane. [1]

#### 3.1. Model turbine

Energija ovakvih sustava se može reći da je besplatna, jer se koristi snaga vode koja je na višoj razini te pada na nižu i naknadno se pretvara u druge oblike. Najstariji oblik je dapače pretvaranje potencijalne energije vode u rotacijsku kinetičku energiju turbine koja nadalje stvara električnu energiju preko generatora. Turbine se mogu kategorizirati u dvije kategorije: impulsne i reakcijske.

##### 3.1.1. Impulsne turbine

Ovakav tip turbina ima jedan ili više raspršivača, tj. noseva gdje se pod tlakom vodi daje velika kinetička energija. Ti raspršivači utječu na lopatice koje se rotiraju i voda nakon udara gubi svu kinetičku energiju. Glavno svojstvo impulsnih turbina (Sl. 3.2.) je nepromjenjivost statičkog tlaka na klizaču koji drži lopatice. Jedini tip hidrauličkih impulsnih turbina je *Peltonova*, te svaka lopatica ima brijeg koji dijeli nadolazeću vodu u dva jednaka dijela. Karakterizira ih visoka pouzdanost, mali troškovi održavanja i efikasnost preko 90%.

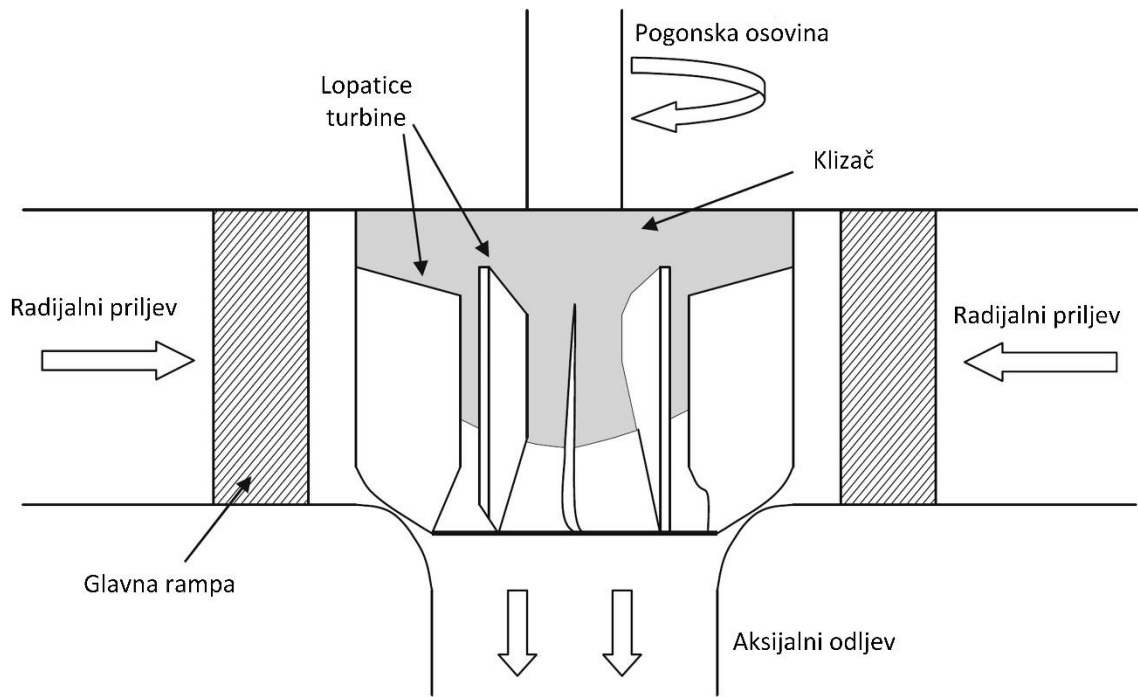


Sl. 3.2. Impulsna *Peltonova* turbina. [1]

### 3.1.2. Reackijske turbine

U ovom tipu turbina voda se puni preko cijelog oboda kroz spiralno kućište od lopatica, tj krilca. Da bi tlak ostao dosljedan, klizač mora biti stalno pun vode, stoga se za razliku od impulsnih turbina, reackijske mogu koristiti kada je posrijedi velika količina vode.

U turbini radijalnog protoka, put je potpuno u ravnini rotacije; primjer je *Francisova* (Sl. 3.3.) turbina. Ako je protok paralelan sa vrtnjom osovine tada se može reći da je aksijalna turbina; primjer je *Kaplanova*.

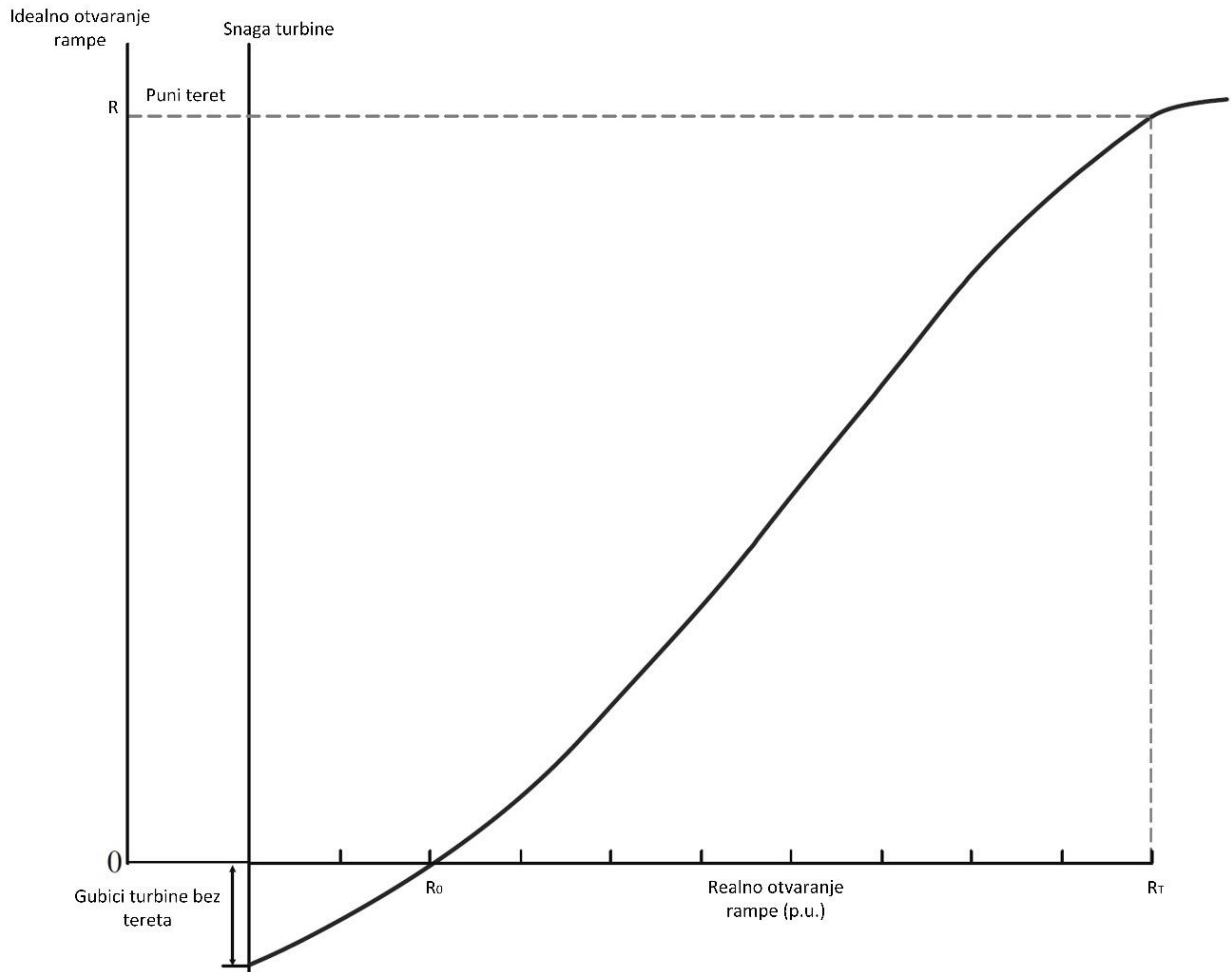


Sl. 3.3. Reakcijska *Francisova* turbina. [1]

### 3.1.3. Rad turbine

Mehanička snaga ( $P_m$ ) u idealnoj hidrauličkoj turbini je proizvod dostupnosti visine vode ( $h$ ) i protoka ( $q$ ), dok je u realnosti snaga smanjena za faktor efikasnosti ( $\eta$ ). Moment turbine pri propisanoj brzini i visini vode je gotovo linearan sa pozicijom lopatica (Sl. 3.4.); najčešće vrijedi za vrijednosti od manjka tereta do propisanog najvećeg tereta.





Sl. 3.4. Ovisnost momenta turbine o poziciji lopatica. [1]

Model turbine je zasnovan na jednadžbi:

$$P_m = \eta q \rho g_a h \quad (3-1)$$

gdje je:

- $P_m$  – snaga turbine,
- $\eta$  – učinkovitost turbine,
- $q$  – protok turbine,
- $\rho$  – gustoća vode,
- $g_a$  – gravitacijsko ubrzanje,
- $h$  – visina vode.

Činjenica da turbina nije 100% učinkovita utječe na jednadžbu, pa se oduzima protok kada nema tereta (engl. *no-load flow*). Postoji i efekt prigušenja turbine, stoga slijedi:

$$\bar{P}_m = A_t \bar{h} (\bar{q} - \bar{q}_{nl}) - D_n \bar{G} \Delta \bar{n} \quad (3-2)$$

$D_n$  uvažava učinak varijacije brzine  $\Delta n$  na efikasnost turbine; vrijednosti  $D_n$  se tipično kreću od 0.5 do 2.0.

## 3.2. Model vodenog stupa

Rad turbine je ovisan o karakteristikama vodenog stupa koji ju napaja; stup se sastoji od inercije vode, stišljivosti vode i elastičnosti stijenki dovoda.

### 3.2.1. Jedno-dovodni model

Karakteristike turbine i dovoda se određuju sa tri jednadžbe; brzina vode u dovodu, ubrzanje vodenog stupa zbog gravitacije i stvaranje mehaničke snage u turbini.

Dovod se modelira sa pretpostavkom da je voda nestišljiva unutar voda duljine  $l$  i površine presjeka  $A$ , gdje su gubici visine vode u dovodu  $h_f$  zbog trenja vode o stijenke voda proporcionalni protoku vode  $q$  na kvadrat.

$$h_f = f_p q^2 \quad (3-2)$$

gdje je:

- $h_f$  – gubici visine vode u dovodu,
- $f_p$  – koeficijent gubitaka visine vode u dovodu zbog trenja,
- $q$  – protok.

Koristeći drugi *Newtonov* zakon za gibanje, može se reći da je voda u dovodu kao tvrd materijal te se sila na masu vode može zapisati:

$$(h_0 - h - h_f) \rho g_a A = \rho A l \frac{dv}{dt} \quad (3-3)$$

gdje je:

- $h_0$  – statična vrijednost visine vodenog stupa,
- $h$  – visina vode prilikom ulaska u turbinu,
- $h_f$  – gubici visine vode zbog trenja,

$f_p$  – koeficijent gubitaka visine vode,

$v$  – brzina vode.

Promjena toka unutar dovoda se određuje:

$$\frac{dq}{dt} = (h_0 - h - h_f) \frac{g_a A}{l} \quad (3-4)$$

Ubrzanje vode zbog promjene visine kod turbine se zapisuje:

$$\rho A l \frac{d\Delta v}{dt} = -\rho g_a A \Delta h \quad (3-5)$$

Ova jednadžba se može zapisati u per unitima dijeleći sa  $v_{base}$  i  $h_{base}$ :

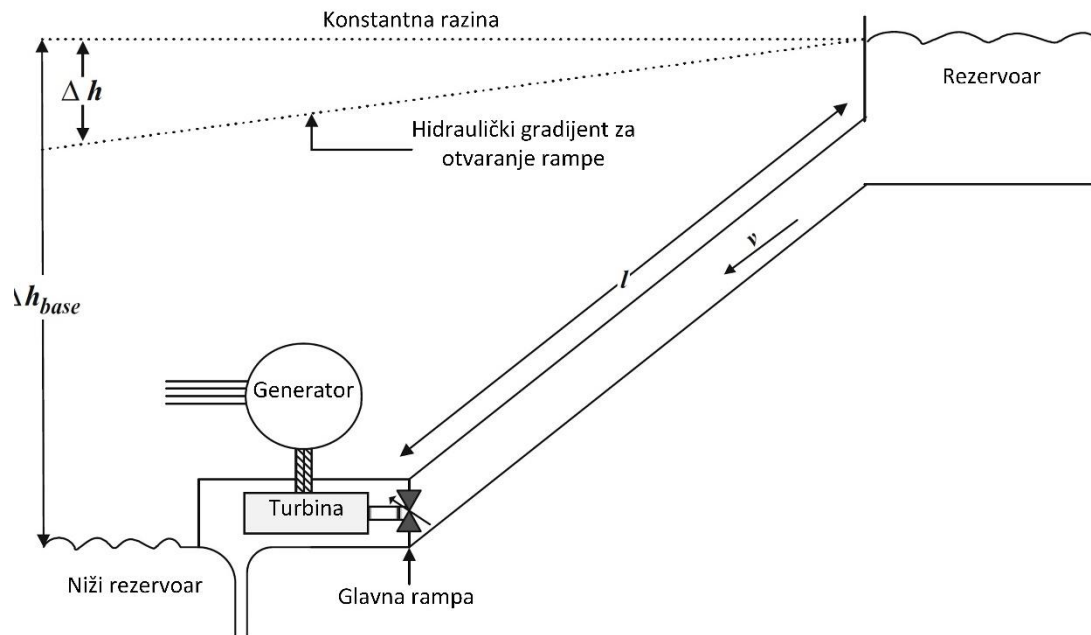
$$\left( \frac{l v_{base}}{g_a h_{base}} \right) \frac{d\Delta \bar{v}}{dt} = -\Delta \bar{h} \quad (3-6)$$

Slijedi oblik jednadžbe:

$$T_w \frac{d\Delta \bar{v}}{dt} = -\Delta \bar{h} \quad (3-7)$$

$$T_w = \frac{\sum l v}{g_a h} \quad (3-8)$$

Gdje  $\sum l v$  je suma duljine i brzine u dijelovima gdje postoji protok vode. Razmatra se pražnjenje rezervoara gdje postoji jedan dovod (Sl. 3.5.). U trenutku otvaranja lopatica  $\Delta t$ , stvaraju se protok u dovodu povećan za  $\Delta v$  te pad visine vode prilikom ulaza u turbinu za  $\Delta h$ . U prijevodu, ako postoji pozitivna promjena tlaka, pojavljuje se negativna akceleracija. Analogno tome, ako postoji negativna promjena tlaka, pojavljuje se pozitivna akceleracija.



Sl. 3.5. Shematski dijagram elektrane sa rezervoarom. [1]

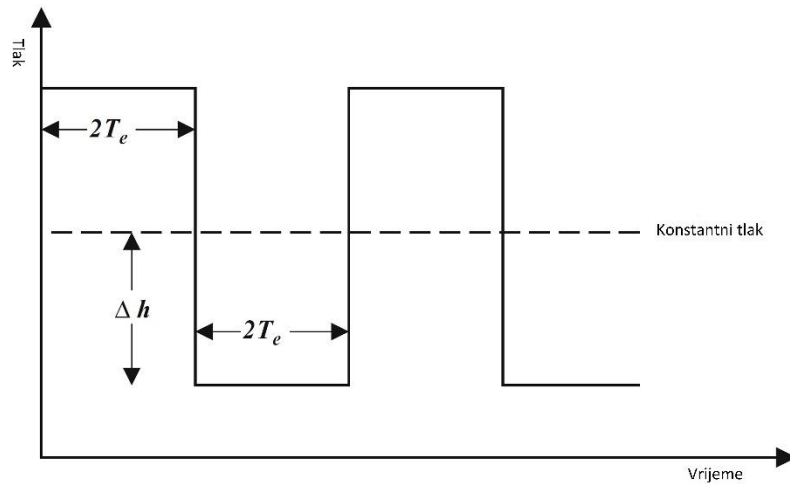
### 3.2.2. Elastičnost vode

U ovakvim modelima treba voditi računa o posljedicama zatvaranja glavne rampe. Newtonov zakon govori da što je brže zaustavljanje, veća je i pripadajuća sila. Ako bi zaustavljanje svih čestica vode bilo trenutno, znači da bi sila na, hipotetski rečeno krutu rampu, bila beskonačna, što nije moguće. Stoga, treba voditi računa o valu vode (Sl. 3.6.) koji se pojavljuje nakon što prve čestice dođu do prepreke. Ti valovi se eventualno prigušuju zbog stijenki dovoda, ali ih se može i matematički opisati:

$$T_e = \frac{l}{a} \quad (3-9)$$

gdje je:

- $T_e$  – vrijeme potrebno da val vode pređe udaljenost dovoda do otvorene površine,
- $l$  – duljina dovoda,
- $a$  – brzina gibanja zvuka u vodi.



Sl. 3.6. Val vode pri naglom zatvaranju rampe. [1]

Val vode eventualno dolazi do prepreke za vrijeme  $t = 2T_e$ . Dobivamo prijenosnu funkciju vala u dovodu:

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = -\frac{T_w}{T_e} \tanh(T_e s + F) \quad (3-10)$$

gdje je:

- $F$  – gubici zbog trenja u dovodu,
- $s$  – Laplaceova kompleksna varijabla frekvencije.

Za potpuno kruti sustav dovoda može se odrediti brzina vala;

$$a = \sqrt{\frac{2.05 * 10^9 \text{ N/m}^2}{10^3 \text{ kg/m}^3}} = 1,432 \text{ m/s} \quad (3-11)$$

### 3.2.3. Kontrola tlaka

Kontrola promjena tlaka može se izvoditi na nekoliko načina.

- Najjednostavnije rješenje je usporiti zatvaranje rampe. Pošto brzina zatvaranja rampe naveliko utječe na tlak, duže trajanje zatvaranja rezultira manjim tlakom. Ako primjerice dovod ima 1000 m, i potrebno je 10 s za potpuno zatvaranje rampe, tlak će biti manji nego da je zadano 5 s vremena za zatvaranje rampe.
- Moguća je postava i otpusnog ventila blizu turbine kako bi se višak vode prilikom zatvaranja mogao otpustiti u donji rezervoar. Ventili se dizajniraju u vidu držanja porasta tlaka unutar prihvatljivih granica.

- Moguća je izgradnja kompenzacijske posude ili bazena. On služi za stabilizaciju tereta turbine, pomaže pri kontroli brzine i diktira tlakom. Služi ujedno kao i zamjenski rezervoar ukoliko teret na turbini nije dovoljan, odnosno nema adekvatnog protoka potrebnog u određenom trenutku pa može ispuštati količinu vode koja je tražena.

### 3.2.4. Model kompenzacijskog bazena

Bazen u sklopu elektrane *Dinorwig* ima kapacitet od 27000 m<sup>3</sup>. Model se zasniva na relaciji toka u čvoru bazena, te se zapisuje:

$$q_t = q_s + q_p \quad (3-12)$$

gdje je:

- $q_t$  – tok niz gornjeg tunela,
- $q_s$  – tok u bazen,
- $q_p$  – tok u turbine.

Tok u bazen ovisi o površini bazena i promjeni razine vode unutar istog:

$$q_s = A_s \frac{dh_s}{dt} \quad (3-13)$$

gdje je:

- $A_s$  – površina bazena,
- $h_s$  – promjena razine vode unutar bazena.

Razina vode u bazenu u *per unitima* se računa:

$$h_s = \frac{q_s}{C_s s} \quad (3-14)$$

Gdje se  $C_s$ , konstanta skladištenja bazena, definira (u sekundama):

$$C_s = \frac{A_s h_{base}}{q_{base}} \quad (3-15)$$

### 3.3. Mehanički model generatora

Od velike važnosti unutar sustava elektrane je kvaliteta napajanja. Sinkroni generator pretvara mehaničku snagu u električnu pri određenoj frekvenciji i naponu. Glavni pokretač može biti diesel motor, parna turbina ili vodna turbina poput elektrane *Dinorwig*.

Model vodi računa o razlici između momenta osovine i elektromagnetskog momenta. Svaka nejednakost u ubrzanju ili usporavanju stroja se može zapisati:

$$T_{acc} = J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_{mech} - T_{elec} \quad (3-16)$$

gdje je:

- $T_{acc}$  – ubrzanje momenta (Nm),
- $J$  – kombinirani moment inercije generatora i turbine (kgm<sup>2</sup>),
- $\delta_m$  – kut mehaničkog momenta rotora (rad),
- $t$  – vrijeme (s),
- $T_{mech}$  – mehanički moment (Nm),
- $T_{elec}$  – elektromagnetski moment (Nm).

Mehanička kružna brzina  $\omega_m$  je derivacija kuta momenta:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{mech} - T_{elec} \quad (3-17)$$

Kinetička energija rotirajućeg tijela iznosi  $1/2J\omega_m^2$ , stoga se jednadžba može zapisati u per unitima uz konstantu H, koja obilježava kinetičku energiju stroja pri nazivnoj brzini i volt – amper potražnji. Koristeći  $\omega_{m0}$  radi obilježavanja nazivne kutne brzine u mehaničkim radijanima po sekundi, dobivamo:

$$\frac{2HVA_{base}}{\omega_{m0}^2} \frac{d\omega_m}{dt} = T_{mech} - T_{elec} \quad (3-18)$$

Mehaničko vrijeme pokretanja,  $T_m$ , se može izračunati:

$$2H \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{T}_{mech} - \bar{T}_{elec} \quad (3-19)$$

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \frac{\bar{T}_{acc}}{2H} \quad (3-20)$$

Konstanta inercije stroja  $H$  je zadana:

$$H = \frac{\text{skladištena energija pri nazivnoj brzini}}{MVA_{rating}} \quad (3-21)$$

Smatramo da je  $T_m = 2H$ , te skladištena energija pri nazivnoj brzini iznosi:

$$\frac{1}{2}J\omega_{m0}^2 * 10^6 \quad (3-22)$$

Te smatramo da nazivna brzina  $\omega_{m0}$  iznosi:

$$\frac{2\pi n_m}{60 \text{ rad/s}} \quad (3-23)$$

gdje je:

$n_m$  – brzina rotora (o/min).

Stoga slijedi:

$$H = 5.4775 * 10^{-9} \frac{Jn_m^2}{MVA} \quad (3-24)$$

U Dinorwig elektrani, ukupna rotaciona inercija turbine je  $H = 3.995$ , stoga vrijeme pokretanja iznosi:

$$T_m = 7.99 \text{ s} \quad (3-25)$$

### 3.4. Model hidroelektrane u Brazilu

Model se zasniva na pretpostavci da je voda nestišljiva te da su dovodi kruti. Postoje dva tipa elektrana; sa jednim dovodom ili sa više, te u oba slučaja imaju zajednički vod. Iako voda zapravo jest stišljiva, i dovodi imaju određenu elastičnost, zadatak ovog modela je analiza kontrolera.

Elektrana sa jednim dovodom ima samo jedan vod koji navodnjava turbine. Iz ravnoteže gibanja slijedi da je promjena toka u dovodu:

$$(h_0 - h_L - h_f) \frac{gA}{l} = \frac{dq}{dt} \quad (3-26)$$

$$h_f = f q^2 \quad (3-27)$$

U p.u. (engl. *per unit*) postaje:

$$(\bar{h}_0 - \bar{h}_L - \bar{h}_f) \frac{1}{T_w} = \frac{d\bar{q}}{dt} \quad (3-28)$$

Početak toka vode se definiše:

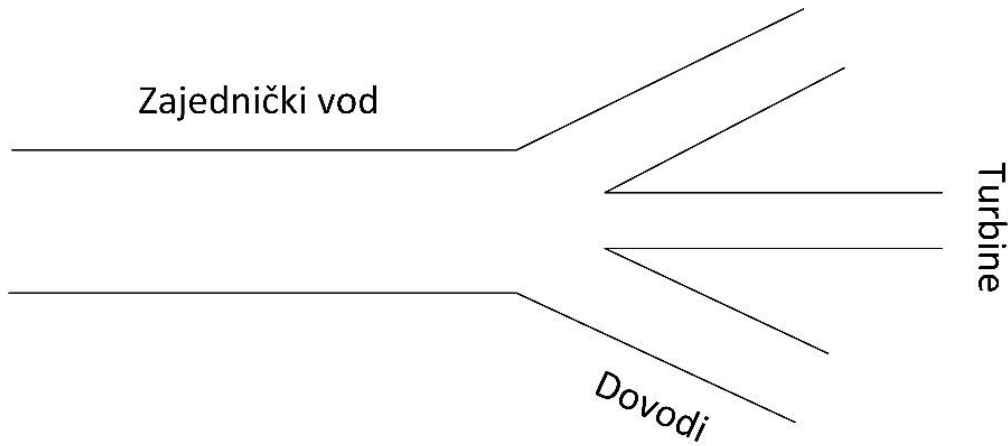
$$T_w = \frac{l q_{base}}{h_{base} g A} \quad (3-29)$$

Ako dovod ima različite dijelove, tada slijedi:



$$T_w = \sum \frac{l_i q_{base}}{h_{base} g A_i} \quad (3-30)$$

Elektrana sa više dovoda i zajedničkim vodom (Sl. 3.7.).



Sl. 3.7. Skica voda sa više dovoda. [8]

Promjena toka unutar dovoda slijedi:

$$(h_{0c} - h_c - h_{fc}) \frac{g A_c}{l_c} = \left( \frac{dq_1}{dt} + \dots + \frac{dq_n}{dt} \right) \quad (3-31)$$

$$(h_{0c} - h_c - h_{fc}) = T_{wc} \frac{dq_c}{dt} \quad (3-32)$$

$$q_c = \sum q_i \quad (3-33)$$

Za svaki zaseban dovod slijedi:

$$(h_{0i} - h_{0c}) - (h_i - h_c) - h_{fi} = T_{wi} \frac{dq_i}{dt} \quad (3-34)$$

Jednadžba se može pisati:

$$(h_{0i} - h_i) - T_{wc} \frac{dq_c}{dt} - h_{fc} - h_{fi} = T_{wi} \frac{dq_i}{dt} \quad (3-35)$$

Iz ovoga slijedi:

$$\frac{dq_c}{dt} = \sum \frac{dq_i}{dt} \quad (3-36)$$

Pod osnovnu opremu analize hidroelektrane spadaju turbina i generator. Distributer daje relaciju između položaja vrata i primarne kontrole, te se opisuje sustavom prvog reda:

$$G_Y(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)} \quad (3-37)$$

Turbina se modelira prema karakteristikci ventila:

$$q = G\sqrt{h_L} \quad (3-38)$$

$G$  se definira:

$$G(s) = \frac{G_0}{1 + T_g s} \quad (3-39)$$

$$G_0(y) = d_0 + d_1 y + d_2 y^2 \quad (3-40)$$

gdje je  $y = 1$  za nazivni položaj, dok  $y = 0$  za zatvoreni položaj.

Mehanička snaga turbine se može zapisati:

$$P_m = \rho g h_L q - K_f \omega^3 \quad (3-41)$$

Koeficijent gubitaka turbine  $K_f$  se definira jednadžbom drugog reda:

$$K_f = a_f q^2 + b_f q + c_f \quad (3-42)$$

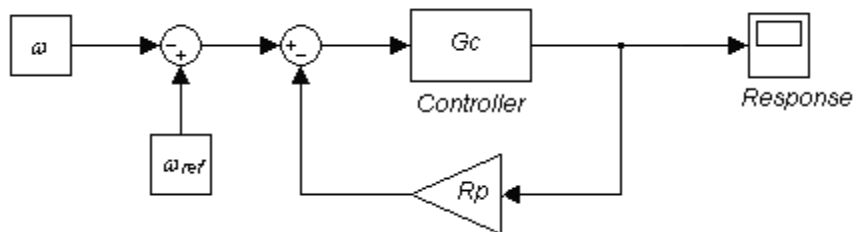
Razlika između mehaničke snage ( $P_m$ ) i električne snage mreže ( $P_e$ ) uzrokuje varijacije na osi momenta koje tvore varijacije kutne brzine. Inercija generatora se definira kao:

$$H = \frac{\text{kinetička energija pri nazivnoj brzini}}{\text{nazivna prividna snaga}} = \frac{1}{2} \frac{J \omega_0^2}{S_N} \quad (3-43)$$

Iz ove formule slijedi:

$$\frac{2HS_N}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (3-44)$$

Jednostavna shema sustava primarne kontrole (Sl. 3.8.) predstavlja povratnu vezu  $R_p$ , što je oscilacija frekvencije i kreće se između 0 % i 5 %.



Sl. 3.8. Shema sustava kontrole. [8]

**Tradicionalni kontroler** ima sljedeću prijenosnu funkciju:

$$G_C(s) = \frac{(1 + sT_r)}{srT_r} \quad (3-45)$$

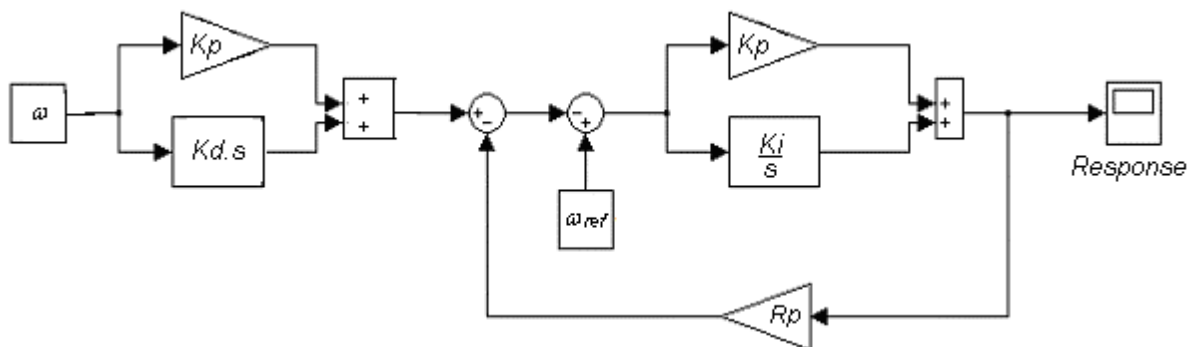
**Proporcionalno integralni** ima sljedeću prijenosnu funkciju:

$$G_C(s) = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3-46)$$

**Proporcionalno integralni i derivacijski** ima sljedeću prijenosnu funkciju:

$$G_C(s) = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3-47)$$

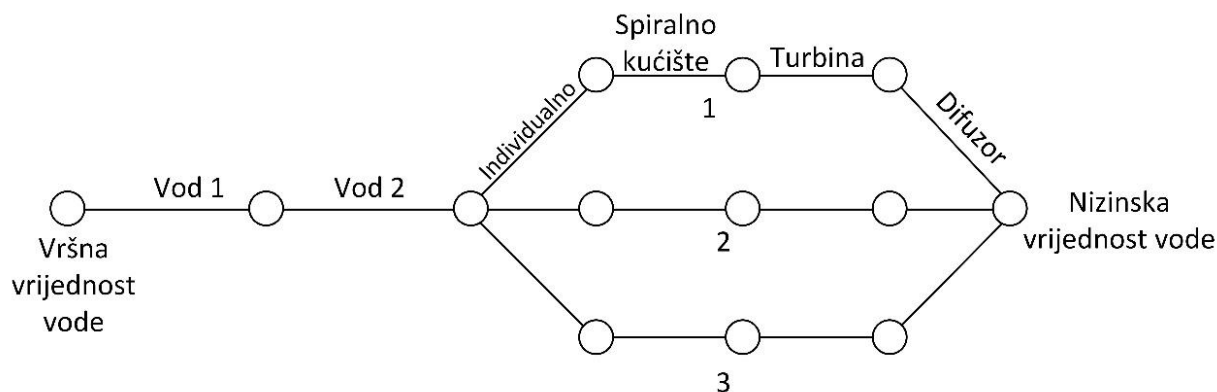
**Proporcionalno integralno i proporcionalno derivacijski** je kombinacija PI i PD regulatora, te ima drukčiju shemu od ostalih (Sl. 3.9.).



Sl. 3.9. Shema PI-PD regulatora. [8]

### 3.4.1. Vrijednosti zadanog sustava

Simulacija, prema stvarnim mjerenjima hidroelektrane sa tri *Francisove* turbine na rijeci Paranapanema u Brazilu, se koristi za izračun parametara. Plan hidrauličkog kruga hidroelektrane je predstavljen na shemi (Sl. 3.10.).



Sl. 3.10. Hidraulički krug hidroelektrane u Brazilu. [8]

Krug	$L$ [m]	$d$ [m]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$T_w$ jedne turbine [s]
Vod 1	1728.0	6.16	29.84	0.74
Vod 2	355.0	4.00	12.57	0.36
Individualno	40.0	2.20	3.80	0.13
Spiralni zavoj	16.6	1.81	2.57	0.08
Difuzor	10.9	2.36	4.37	0.03
			Ukupno	1.34

Tab. 3.1. Hidraulički krug [8]

Vršna razina vode ( $h_M$ ) je 479.2 metara, a najniža ( $h_J$ ) 303.7 do 311.8 metara. Tako da neto vrijednost visine vode iznosi 165.4 do 173.5 metara. Inercija generatora ( $J$ ) je 600 t $m^2$ .

Optimalni uvjeti za rad su:

- Brzina: 450 o/min
- Snaga: 32.37 MW
- Protok: 21.0 m<sup>3</sup>/s
- Neto vode: 168 m

Neto vode se računa preko:

$$h_L = h_M - h_J - 0.000964 \sum q^2 \quad (3-48)$$

Proračun stabilnosti je proveden u skoro pa optimalnim uvjetima. Neto vode varira od 167 m do 169 m. Trajanje otvaranja vrata ( $y = 0.0$  do  $y = 1.0$ ) iznosi 9.4 s.

$Y$ [pu]	$q$ [m <sup>3</sup> /s]	$\eta$ [%]	$P$ [MW]
0.5	15.2	91.5	22.6
0.6	18.0	93.5	27.4
0.7	20.9	94.4	32.0
0.8	23.3	94.0	35.6
0.9	25.3	93.5	38.5
1.0	27.4	92.7	41.4

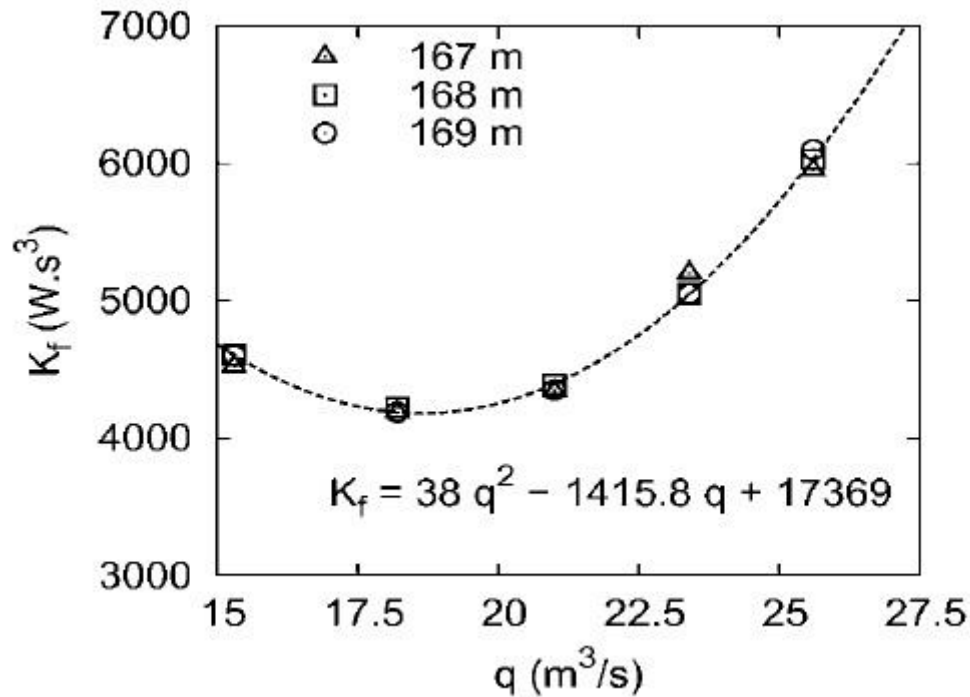
Tab. 3.2. Radne točke za neto vode 167 m. [8]

$Y$ [pu]	$q$ [m <sup>3</sup> /s]	$\eta$ [%]	$P$ [MW]
0.5	15.3	91.5	23.0
0.6	18.0	93.6	28.0
0.7	21.0	94.4	32.4
0.8	23.4	94.1	36.0
0.9	25.4	93.5	39.0
1.0	27.5	92.8	42.0

Tab. 3.3. Radne točke za neto vode 168 m. [8]

$Y$ [pu]	$q$ [m <sup>3</sup> /s]	$\eta$ [%]	$P$ [MW]
0.5	15.3	91.5	23.0
0.6	18.2	93.6	28.0
0.7	21.0	94.4	32.6
0.8	23.4	94.0	36.3
0.9	25.6	93.5	39.3
1.0	27.7	92.8	42.2

Tab. 3.4. Radne točke za neto vode 169 m. [8]



Sl. 3.11. Koeficijent gubitaka turbine ovisne o toku za različite neto vrijednosti vode. [8]

Osnovne vrijednosti koje se koriste za parametre modela se nalaze u Tab. 3.5.

$q_{base}$ [ $m^3/s$ ]	$h_{base}$ [m]	$P_{base}$ [kW]	$\omega_{base}$ [Hz]
Protok u optimalnoj radnoj točki	Neto vode u optimalnoj radnoj točki	Nazivna prividna snaga	Nazivna brzina
21.0	168.4	35966.7	7.5

Tab 3.5. Osnovne vrijednosti za računanje parametara. [8]

Parametri  $G_i$  i  $T_i$  se definiraju:

$$G_i = \frac{1}{\overline{P}_G D_{pf} \omega_0} \quad (3-49)$$

$$T_i = \frac{2H}{\overline{P}_G D_{pf} \omega_0} \quad (3-50)$$

Vremenska konstanta vrata se pretpostavlja 1 s. Za pokretač,  $T_1$  predstavlja vrijeme potrebno da se vrata otvore od  $y = 0.0$  do  $y = 0.632$ , stoga  $T_1$  iznosi 5.94 s. Ovo rezultira sustavom prvog reda:

$$G_Y(s) = \frac{1}{(5.94s + 1)} \quad (3-51)$$

$T_w$ [s]	$f'$	$d_0 - d_1y + d_2y^2$	$H$	$G_i$	$T_i$	$a_fq^2 + b_fq + c_f$
1.34	0.002524	$-0.570 + 2.023y - 0.142y^2$	0.469	7.407	6.951	$0.197q^2 - 349q + 0.204$

Tab. 3.6. Parametri modela u per unitima. [8]

Rezultati modela ukazuju na vrlo male devijacije od stvarnih mjerenja, od -0.54 % do 0.76 %, što je u prihvatljivim granicama te se ovaj model smatra zadovoljavajućim za ovu elektranu.

$Y$ [pu]	$q$ [%]	$h_L$ [%]	$P_m$ [%]	$P_G$ [%]	$\Delta\omega$ [%]
0.7	0.60	-0.01	0.76	0.76	0.0006
0.8	0.38	-0.03	0.29	0.29	0.0004
0.9	-0.54	0.01	-0.15	-0.15	0.0010
1.0	0.04	0.06	0.49	0.49	0.0045

Tab 3.7. Devijacije rezultata modela u usporedbi sa stvarnim mjerenjima. [8]

## 4. SUSTAV UPRAVLJANJA

Ako ne svi, barem većina sustava upravljanja (Sl. 4.1.) hidroelektrana su dizajnirani na lineariziranom modelu jednog ulaza i jednog izlaza (engl. *Single Input Single Output*). Ipak, samtra se da hidroelektrane nisu dizajnirane već prilagođene standardnoj proceduri PI ili PID regulatora. Problem kod ovoga je što je sustav dinamičan, te se optimalne operativne točke turbine mijenjaju zbog promjene toka vode ili neto vrijednosti vode, tako da određeni parametar kontrolera je optimalan samo za jednu točku sustava.



Sl. 4.1. Modernizirani sustav upravljanja (1986.) u *Burglauenen* (Jungfrauoch-Bahn, Švicarska), sa dvije *Peltonove* jedinice po 1 MW. [9]

Nedavna otkrića i testiranja pokazuju da linearizirani sustavi sa dva ulaza i dva izlaza (engl. *Multiple Input Multiple Output*) daju znatno bolju reprezentaciju dinamike sustava nego *SISO*.

### 4.1. Megawatt – frekvencija upravljanje ( $P - f$ upravljanje)

Frekvencija treba ostati dosljedna, konstantna da bi sustav bio u granicama dobrog rada. Kontrola frekvencije osigurava konstantnu brzinu motora. Frekvencija sustava ovisi o ravnoteži aktivne snage, pošto frekvencija predstavlja uobičajeni faktor unutar sustava. Promjena frekvencije direktna je poveznica i zrcali promjeni potražnje aktivne energije u određenom trenutku. Grešku frekvencije se gleda kao osjetljivi indikator promjene snage; slijedi povećanje ili smanjenje proizvedene snage.



## 4.2. Megavar – napon upravljanje ( $Q - V$ upravljanje)

Kontrola napona se provodi upravljanjem protokom, apsorpcijom ili proizvodnjom reaktivne snage na svim razinama sustava. Ovisno o uzbuđi, sinkroni generator može proizvoditi ili apsorbirati reaktivnu snagu. Kada su naduzbuđeni tada opskrbljuju sustav reaktivnom snagom, dok poduzbuđeni generator apsorбира reaktivnu snagu. Promjena u naponu je osjetljivi indikator da postoji promjena reaktivne snage; slijedi povećanje ili smanjenje reaktivne snage.

*Dinorwig* je konfiguriran za upravljanje  $P - f$  sustavom. U tom slučaju dovoljno je implementirati promjene frekvencije i ignorirati promjene napona koje ovise o reaktivnoj snazi. Primjerice, susjedna regija ima promjene u teretu iznosa  $\Delta P_L$ , te promjena u proizvedenoj radnoj snazi  $\Delta P_G$  se pojavljuje zbog kontrole frekvencije. Slijedi ukupni višak snage sustava:

$$\Delta P = \Delta P_G - \Delta P_L \quad (4-1)$$

Ovaj višak u sustavu se može apsorbirati odnosno kompenzirati na tri načina:

- Promjenama u kinetičkoj energiji sustava, što je povezano sa promjenom frekvencije sustava.
- Povećanje izvoza snage susjednim regijama.
- Povećanje potrošnje opterećenja.

Osjetljivost tereta sustava na frekvenciju se izražava uz faktor prigušenja  $D$ , koji predstavlja promjenu snage za zadanu frekvenciju. Uobičajene vrijednosti  $D$  su 1 – 2 %; vrijednost  $D = 2$  znači da promjena frekvencije za 1% rezultira promjenom tereta za 2%. Sustav je krući što su promjene frekvencije manje za promjenu tereta.

## 4.3. Upravljanje frekvencijom tereta

Karakteristike sinkronih generatora traže da se vrte pri određenim brzinama. Ako postoje dva ili više generatora spojenih na isti električni sustav, moraju se ponašati kao da su spojeni na istu osovinu.

Postoje dvije sheme kontrole za pokretače generatora:

- Prvi tip je kontrola jednakog vremena, gdje pokretač zalijeće generator do te brzine koja odgovara mreži (engl. *isochronous*). Često se koristi kada generatora napaja izolirani teret, ili relativno maleni sustav.

- Drugi tip je regulacija brzine, gdje regulator otvara rampu do određenog položaja koji je dobiven relacijom između frekvencije sustava i brzine vrtnje. Brzina turbine se ne može mijenjati kada je generator spojen aktivno na mrežu, ali je moguće promijeniti referencu brzine regulatora. Srozanje (engl. *droop*) jedinice sustava se definira:

$$R\% = \frac{\Delta f(\Delta w)}{\Delta P} = \frac{f_{nl} - f_{fl}}{f_0} * 100 \quad (4-2)$$

gdje je:

- $f_{nl}$  – stabilna vrijednost frekvencije bez tereta,
- $f_{fl}$  – stabilna vrijednost frekvencije pri punom teretu,
- $f_0$  – nazivna frekvencija.

Tipično karakteristika srozanja u UK je 4 %, što znači da devijacija od 4 % uzrokuje 100 % promjenu u izvozu generatora. Ustaljeno stanje devijacija frekvencije koja prati promjenu tereta  $\Delta P_L$ , za sustav koji radi na principu srozanja brzine se zapisuje:

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\left(\frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n}\right) + D} = \frac{-\Delta P_L}{\beta} \quad (4-3)$$

gdje je:

- $n$  – broj jedinica koje radi sa regulatorom brzine,
- $\beta$  – krutost (MW / Hz).

Koeficijent  $\beta$  govori o tome ako dođe do promjene u teretu sustava, sustav će osjetiti promjene i u frekvenciji. Što su te promjene frekvencije manje, znači da je sustav "tvrđi" odnosno krući.

Izlazna snaga svake jedinice zasebno pod kontrolom regulatora iznosi:

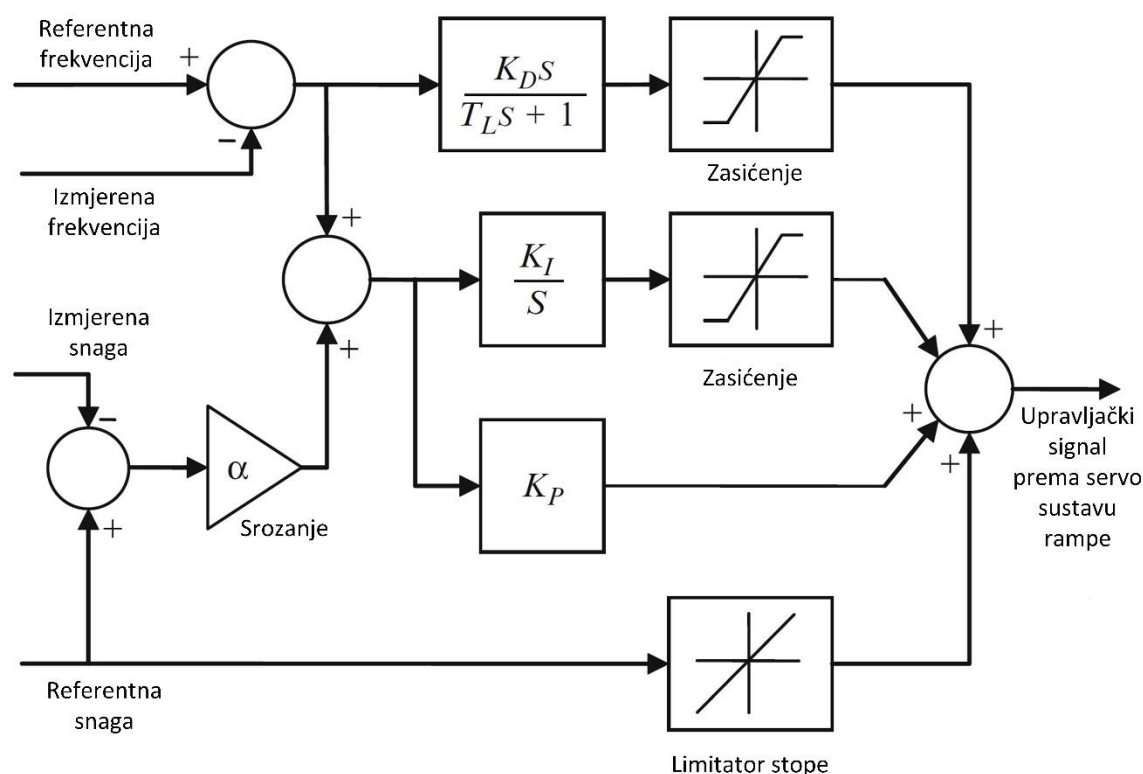
$$\Delta P_T = -\frac{\Delta f_{ss}}{R_{unit}} \quad (4-4)$$

#### 4.4. Osnovne petlje upravljanja

Generatori spojeni na mrežu, moraju voditi računa o individualnom doprinosu snage te se drže u pripravi kao regulatori frekvencije. Elektrane takvu proceduru vrše uz kontrolu dviju varijabli, odnosno kontrolu dviju petlji:

- Kontrola snage
- Kontrola frekvencije

U interesu dobavljača električne energije je držati ravnotežu aktivne snage kako bi frekvencija (Sl. 4.2.) ostala u prihvatljivim granicama. Također, cilj je držati se zadanog naponskog profila mreže, kako bi u svakoj točki napon mreže bio približno jednak, radi osiguravanja potrošačkih uređaja.



Sl. 4.2. Blok dijagram običnog PID regulatora za kontrolu snage i frekvencije. [1]

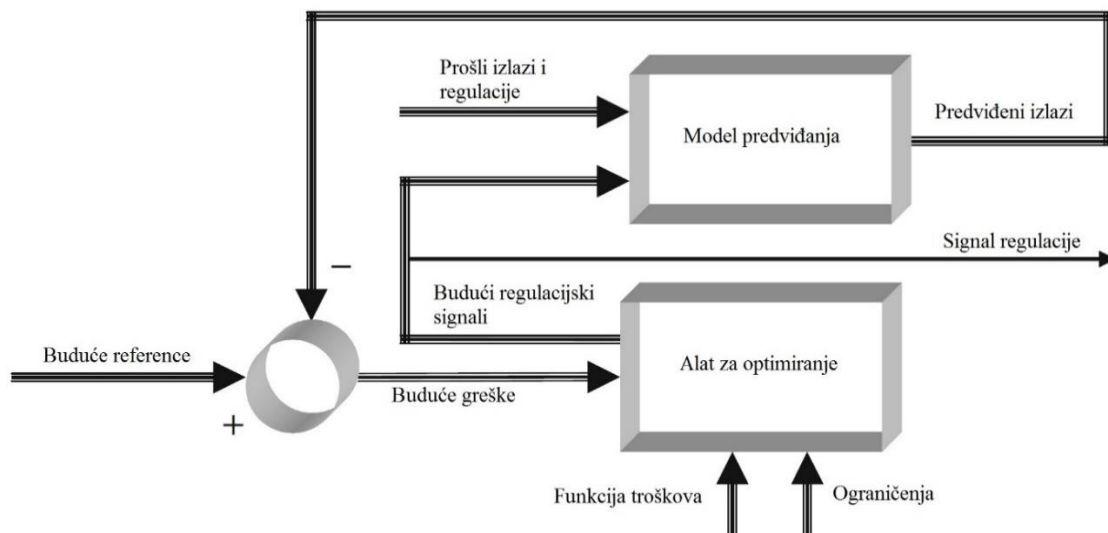
Petlja kontrole snage stvara signal greške kako razlika između mjerene i referentne vrijednosti raste. Vrijednost greške se množi opadom brzine regulacije i dovodi se do PI regulatora čiji izlaz se koristi za prilagodbu lopatica turbine u elektro – hidrauličnom servo sustavu.

Petlja kontrole frekvencije naveliko pridonosi kontroli snage; istim principom, poredbom mjerene i referentne vrijednosti frekvencije, petlja vrši proračun ovisno o tome je li frekvencija veća ili manja od nazivne te korigira sukladno tome. Prilikom ogromnih devijacija frekvencije, npr. ispada elektrane s mreže, dolazi do primarnog odaziva. U ovim okolnostima povratna veza o frekvenciji je isključena i generator je postavljen na maksimalni rad.

## 4.5. Metode predviđanja

Predvidne regulacije modela (engl. *Model Predictive Control - MPC*) su metode koje matematički određuju buduće regulacijske signale uz najmanje moguće gubitke. Prilikom usporedbe sa referentnim obzorom signala, ove metode računaju regulacijski signal kako bi se minimizirao indeks performansi. Također može se računati nadolazeća referentna putanja koju bi sustav trebao pratiti; samim time može se ublažiti prijelazna karakteristika sustava. Za kriterij se uobičajeno uzima kvadratna funkcija devijacije predviđenog izlaznog signala iz referentne buduće putanje.

Može se također reći da predvidni modeli se koriste za računanje predviđenih izlaza zasnovanih na prošlim ulaznim i izlaznim te budućim ulaznim regulacijskim signalima. Različite metode predvidne regulacije koriste različite modele predviđanja. Proces modela mora prikazivati dinamiku sustava vjerodostojno kako bi što točnije predvidio stanje sustava i pritom smanjio vrijeme koje je potrebno računalu za kalkulaciju podataka.



Sl. 4.3. Općenita metoda predviđanja. [1]

Primjena ovakvih regulacija nije česta, ali postoji. Primjerice, u termalnoj elektrani bojler – turbina se regulira uz hijerarhijski pristup. Strategija se sastoji od dvo – razinske regulacijske strukture: nižu razinu kontrolira konvencionalni PI regulator dok višu razinu regulira nelinearni fizikalni regulator predvidnog modela (engl. *Nonlinear Physical Model Predictive Controller - NPMPC*). Stabilizaciju dinamike bojlera vrši PI regulator te omogućava brži odaziv ventila za regulaciju snage i frekvencije. Optimalnu tranziciju za optimalnim teretom vrši NPMPC sa učinkovitim rukovanjem interakcija i ometanja sustava.

## 5. ANALIZA UPRAVLJANJA

Povodom analize regulacije, prethodno je u sustavu odrediti točke rada. Proces traženja ovih točki zahtjeva matematičku analizu varijabli koje su ugrađene u regulator radi optimiranja rada sustava.

Elektrane imaju specifičan sustav kontrole radi osiguranja stabilnog rada. Razni problemi utječu na rad elektrane, stoga kontrola frekvencije je od iznimne važnosti te se mora držati unutar propisanih granica. Dizajn sustava kontrole hidrauličkih turbina ostaje izazov i veliki problem zbog nelinearne karakteristike elektrana, sve većeg broja čvorova, te utjecaja velikih potrošača i proizvođača.

Primarna kontrola se sastoji od senzora brzine, regulatora, pokretača i hidrauličkog sustava dostave. Izolirani rad se pojavljuje kada se nazire problem u mreži, te se u tom slučaju prioritet primarne kontrole diže na visoku razinu. Razvoj numeričkih modela za hidroelektrane se pokazao koristan za razumijevanje karakteristike elektrane i za predviđanje dinamike sustava.

Danas se zadatak kontrole zasniva na modeliranju elektrane koristeći nelinearni model osnovan na diferencijalnim jednadžbama sa parametrima koji se lako dobiju testiranjem. Drugi dio zadatka je promatranje primarne kontrole sustava u izoliranom modelu radi određivanja seta parametara za odabrane kontrolere.

Za razliku od uobičajenog rada generatora kada je spojen na mrežu gdje se u dizajnu regulatora mora voditi računa o dinamičkim svojstvima same mreže na koju je spojen. Tijekom rada izolirane elektrane, stroj mora održavati frekvenciju sustava. Prilikom same analize izoliranog načina rada postoje pretpostavke koje se moraju poštivati:

- Hidro sustav radi sa malim smetnjama od strane tereta.
- Voda je nestišljiva i nema elastičnosti dovoda.
- Hidraulična spojka se ignorira.
- Turbina radi u takvoj točki da se promjenom pozicije rampe proporcionalno mijenja i izvoz snage generatora. Drugim riječima linearizirana je ovisnost protoka i dobivene snage.
- Dinamika rampe se pretpostavlja toliko brza da se izostavlja.

### 5.1. Analiza regulacije HE *Dinorwig*

Dinamički odziv sustava zatvorene petlje je određen pozicijom polova na kompleksnoj ravnini. Ukoliko je barem jedan pol s desne strane kompleksne ravnine sustav je nestabilan, te ako se polovi

nalaze na ordinati tada je sustav na rubu stabilnosti. Ovaj proces je ukratko traženje vrijednosti unutar regulatora za koje će sustav biti stabilan. Rješavanjem karakteristične jednadžbe dobivaju se polovi:

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (5-1)$$

$H(s)$  predstavlja povratnu vezu u našem sustavu, dok  $G(s)$  označava prijenosnu funkciju cijelog sustava, te vrijedi:

$$G(s) = \frac{(K_p s + K_i + K_d s^2)(1 - T_w s)}{s(1 + 0.5T_w s)(T_m s + D)} \quad (5-2)$$

Karakteristična jednadžba se može zapisati u polinomialnom obliku:

$$A(s) = A_0 s^n + A_1 s^{n-1} + A_2 s^{n-2} + A_3 s^{n-3} + \dots + A_{n-1} s + A_n = 0 \quad (5-3)$$

Glavna karakteristika za stabilnost govori da svi korijeni imaju negativni realni dio. Routh – Hurwitzov kriterij stabilnosti kombinira prijenosnu funkciju sustava i regulatora te rezultira analitičkim granicama stabilnosti cijelog sustava. U ovom slučaju karakteristična jednadžba se može zapisati:

$$\left[ K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \right] \left[ \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s} \right] \left[ \frac{1}{T_m s + D} \right] + 1 = 0 \quad (5-4)$$

Te u obliku polinoma izgleda:

$$A(s) = s^3(0.5 - X_3) + s^2(X_3 - X_1 + 1 + 0.5X_4) + s(X_1 - X_1 X_2 + X_4) + X_1 X_2 = 0 \quad (5-5)$$

gdje varijable iznose:

$$X_1 = K_p \frac{T_w}{T_m} \quad (5-6)$$

$$X_2 = K_i \frac{T_w}{K_p} \quad (5-7)$$

$$X_3 = \frac{K_d}{T_m} \quad (5-8)$$

$$X_4 = D \frac{T_w}{T_m} \quad (5-9)$$

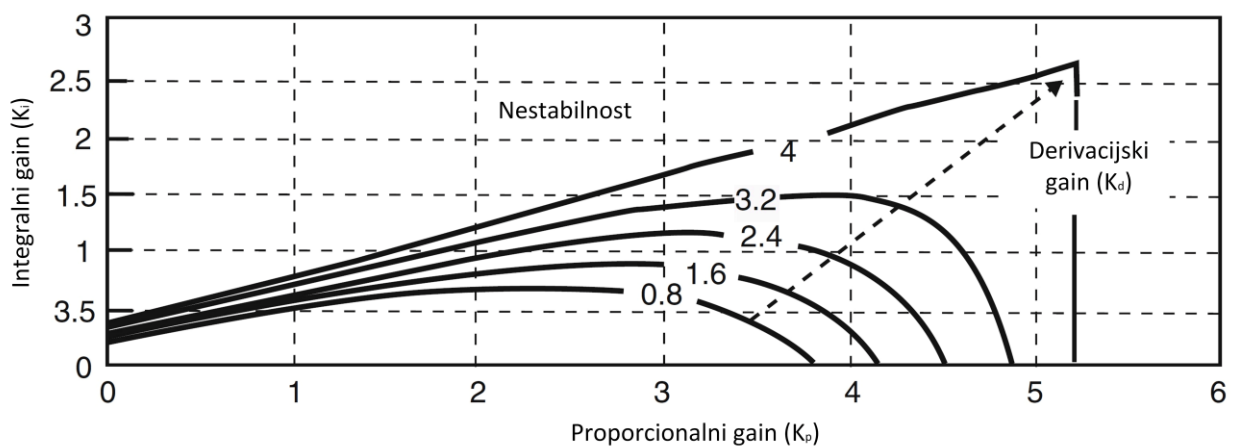
Routhovim testom dajemo daljnje uvjete sustavu, gdje se polinomialni oblik jednadžbe dalje rješava, elementi su grupirani uz stupanj *Laplaceoveg* koeficijenta:

$s^3$	$A_0$	$A_2$
$s^2$	$A_1$	$A_3$
$s$	$B_1 = -\frac{\det \begin{bmatrix} A_0 & A_2 \\ A_1 & A_3 \end{bmatrix}}{A_1}$	
$s^0$	$C_1 = -\frac{\det \begin{bmatrix} A_1 & A_3 \\ B_1 & 0 \end{bmatrix}}{B_1}$	

Svi elementi moraju biti pozitivni te slijedi:

- $A_0$  je pozitivan ako  $0.5 - X_3 > 0$ , tj.  $0.5 > X_3$ ; derivacijski gain je tada  $K_d < 0.5T_m$ .
- $A_1$  je pozitivan ako  $1 - X_1 + X_3 + 0.5X_4 > 0$ , tj.  $X_1 < 1 + X_3 + 0.5X_4$ .
- $A_2$  je pozitivan ako  $X_1 - X_1X_2 + X_4 > 0$ , tj.  $1 + (X_4/X_1) > X_2$ .
- $A_3$  ( $C_1$ ) je pozitivan ako  $X_1X_2 > 0$ .
- $B_1$  je pozitivan ako  $A_1A_2 - A_0A_3 > 0$ , tj:

$$(1 - X_1 + X_3 + 0.5X_4)(X_1 - X_1X_2 + X_4) - (0.5 - X_3)(X_1X_2) > 0 \quad (5-10)$$



Sl. 5.1. Granice stabilnosti za  $X_4 = 0.2$ . [1]

Za *Dinorwig* hidroelektranu, vrijednosti unutar PID regulatora su:

$K_p$	$K_i$	$K_d$
2.5	0.8	$K_d < 4$

Tab. 5.1. Vrijednosti PID regulatora. [1]

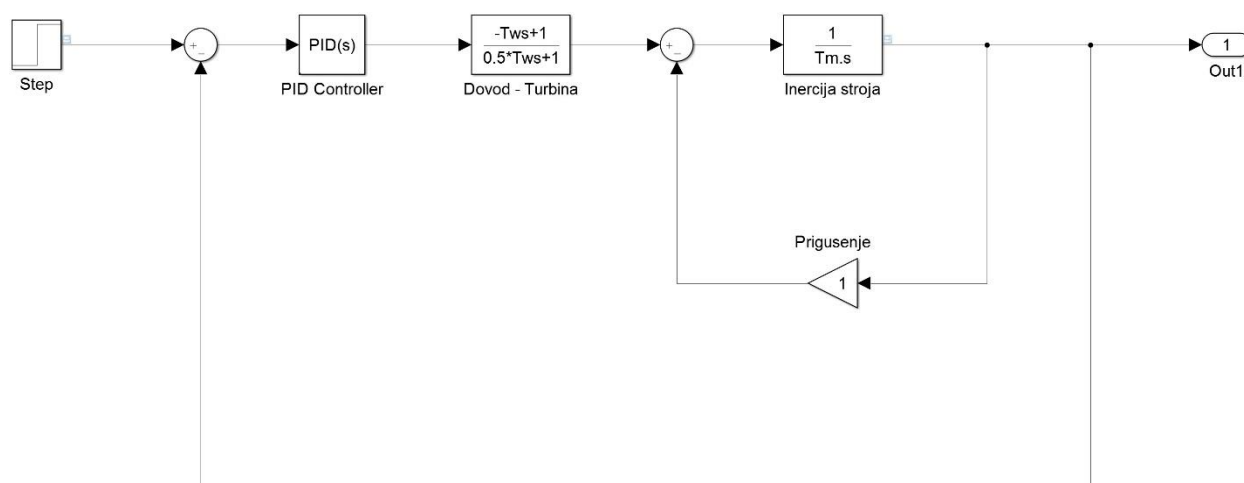
Dok trenutne vrijednosti unutar regulatora nisu reprezentacija optimalnosti, koriste se radi testiranja valjanosti uređaja i je li sustav i dalje istog karaktera kao što je bio prilikom optimiranja regulatora.

Idealne vrijednosti PID regulatora u *Dinorwigu* glase:

$K_p$	$K_i$	$K_d$
$0.97 \frac{T_m}{T_w}$	$0.39 \frac{T_m}{T_w^2}$	$0.4T_m$

Tab. 5.2. Vrijednosti PID regulatora. [1]

Prilikom analize u *Simulinku* za PID regulator korištena je shema prema Sl. 5.2.



Sl. 5.2. *Simulink* shema korištena u primjeru sa PID regulatorom. [1]

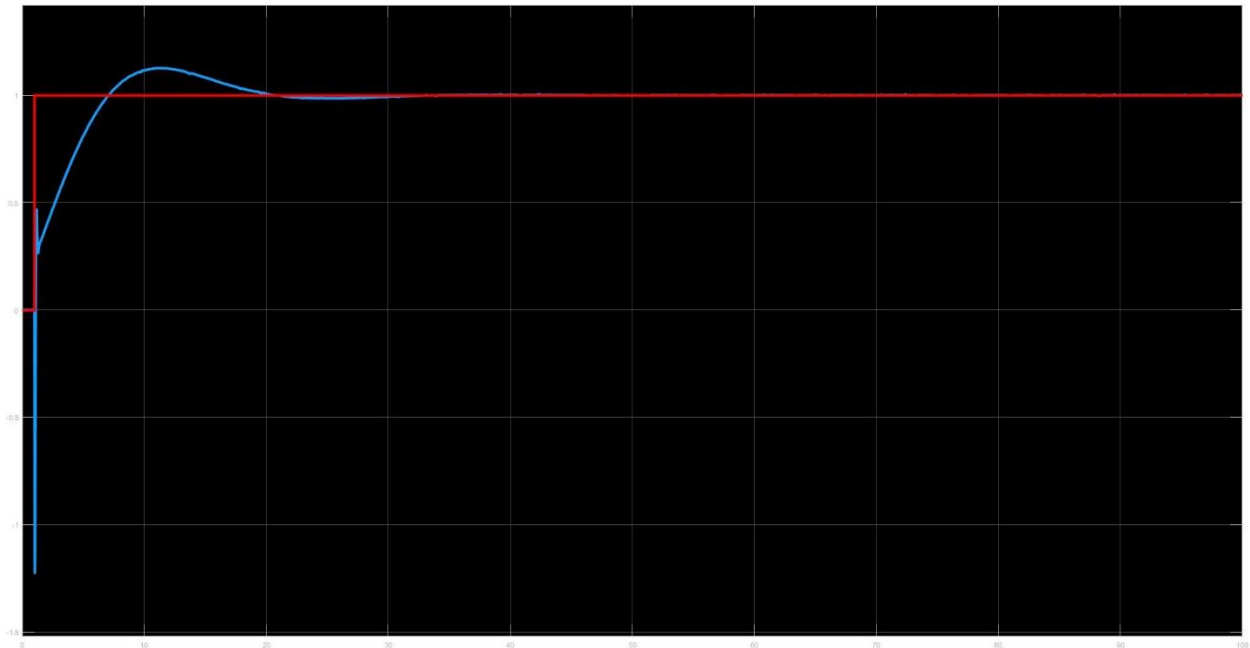
Unutar PID regulatora unešene su sljedeće vrijednosti:

$K_p$	$K_i$	$K_d$
2.5	0.8	3

Tab. 5.3. Vrijednosti PID regulatora. [1]



Ovakva postava regulatora rezultira sljedećim:



Sl. 5.3. Odziv sustava sa prihvatljivim postavkama PID regulatora.

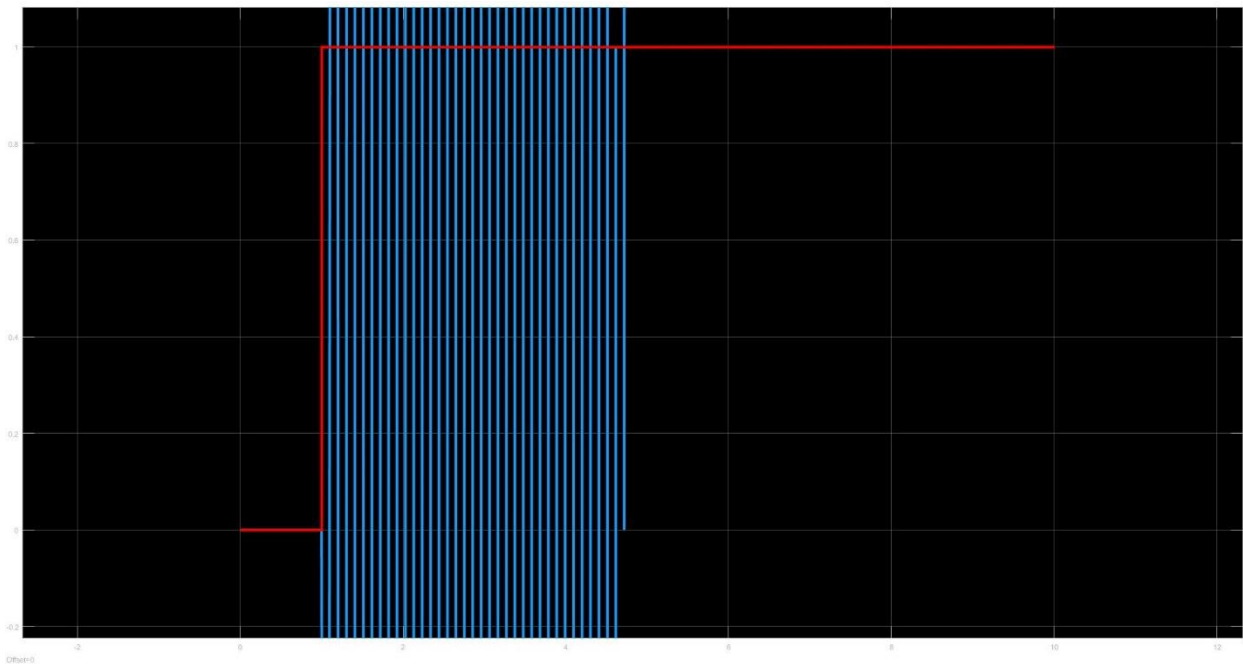
Tijekom ove simulacije vrijeme ustaljenja sustava je oko 25 s, što je poprilično dugo.

Unutar PID regulatora unešene su sljedeće vrijednosti:

$K_p$	$K_i$	$K_d$
2.5	0.8	5

Tab. 5.4. Vrijednosti PID regulatora.

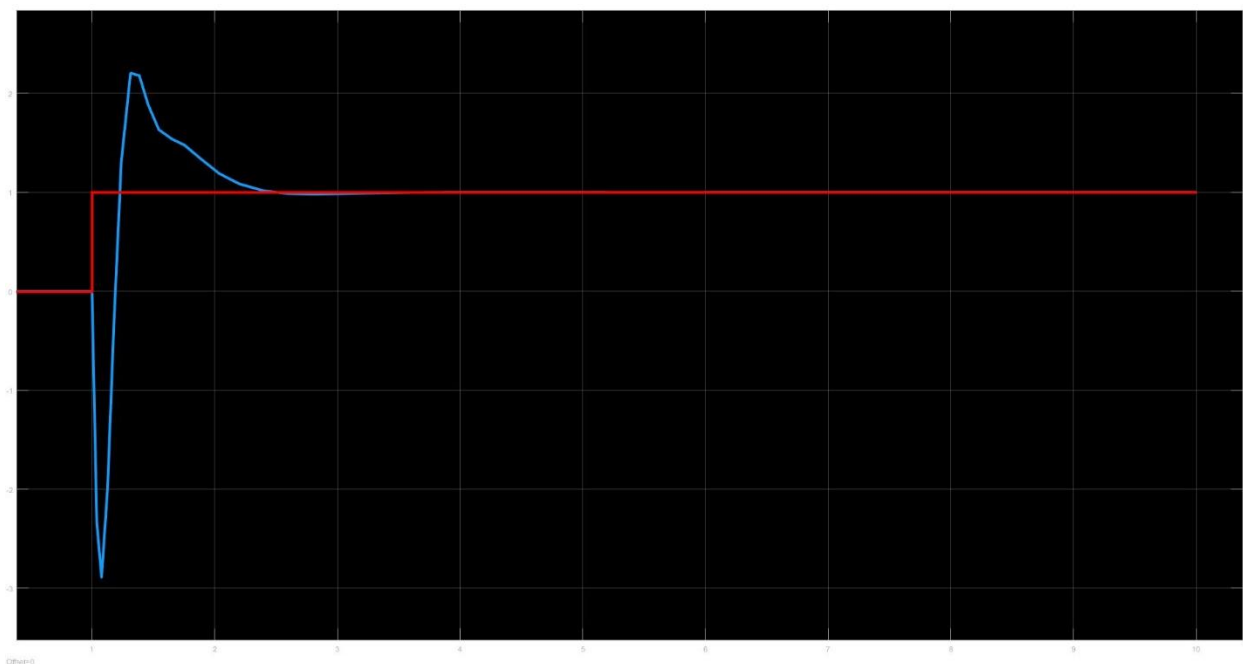
Rezultati ove postave su:



Sl. 5.4. Odziv sustava sa neprihvatljivim postavkama PID regulatora.

Kao što je navedeno u analizi vrijednosti regulatora, derivacijski gain ne smije biti veći od 4, u ovom slučaju je 5. Rezultati ovakve postave ukazuju na to da je sustav nestabilan.

Unutar PID regulatora unešene su vrijednosti optimalne kontrole prema Tab. 5.2. Rezultati su sljedeći:



Sl. 5.5. Odziv sustava sa idealnim postavkama PID regulatora.

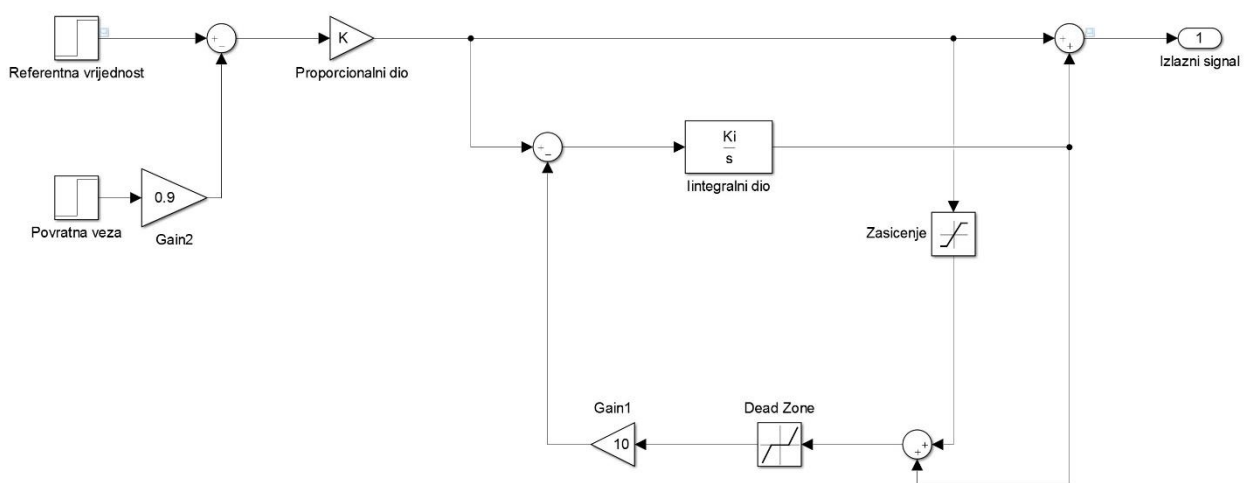
Rezultati ovakve postave regulatora ukazuju na popravljeno vrijeme ustaljenja sustava. U usporedbi sa prijašnjim rezultatima koji su u granicama tolerancije, vrijeme ustaljenja je palo sa 25 s na 2.5 s. Početne oscilacije su veće nego u prijašnjem primjeru, ali je to očekivano od sustava koji se pokušava protiviti promjeni stanja.

### 5.1.2. PI regulator unutar *Dinorwiga*

U realnosti, hidroelektrana *Dinorwig* koristi regulator bez derivacijskog djelovanja. Ukoliko je PI regulator točno podešen, sustav može davati odlične rezultate. Glavni cilj kod podešavanja je naći dobru ravnotežu između osjetljivosti, brzine odziva i krutosti kontrole.

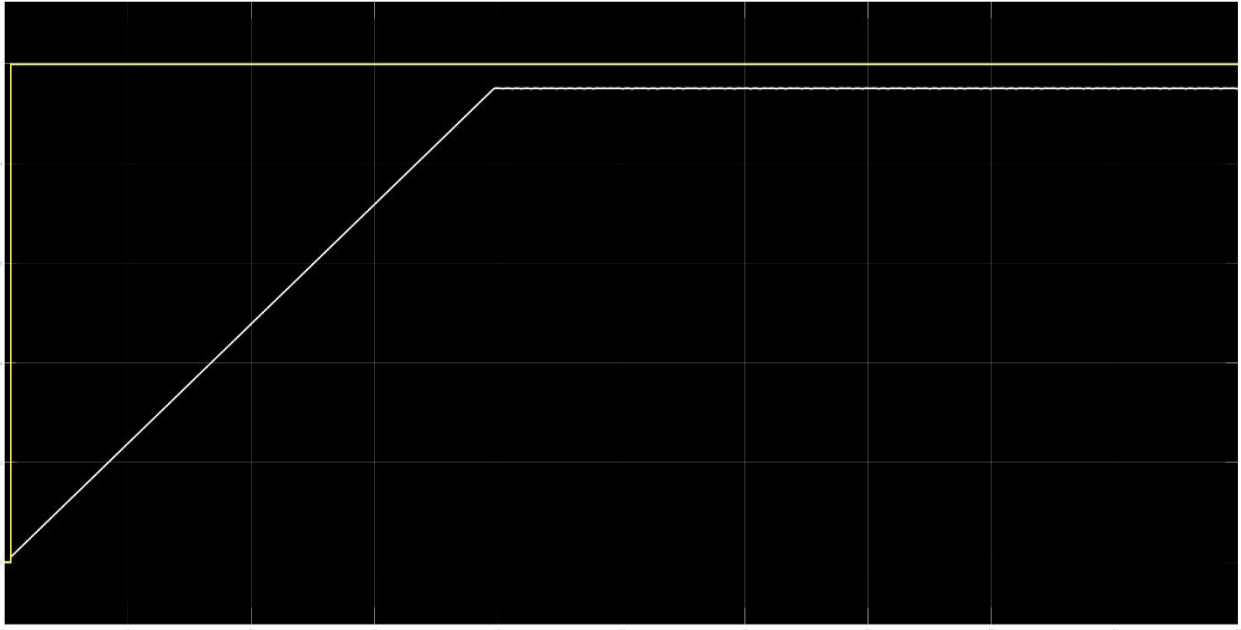
Posebna vrsta regulatora se može koristiti prilikom kontrole. Jedan od takvih regulatora naziva se protu – zamašni regulator (engl. *anti – windup*) prema Sl. 5.6. U ovom slučaju elektrana ima zasićenje pokretača, te time vrijednost integratora postaje veoma veliko. Rezultat ovog upravljanja je puno veće vrijeme ustaljenja.

Ovaj regulator ima unutarnji povratni put, koji dovodi integrator u negativnu vrijednost te diktira izlaz u linearnom obliku.



Sl. 5.6. Shema sa protu – zamašnim PI regulatorom. [1]

Odzivi ovakvog sustava su različiti od prijašnjih PID regulatora. Pošto regulator diktira izlazni signal u linearnom obliku, stoga je zamah sustava puno manji ali rezultat je puno veće vrijeme ustaljenja.



Sl. 5.7. Odziv sustava prilikom korištenja protu – zamašnog PI regulatora.

Povodom simulacije povratne veze u regulator, uzeta je vrijednost 10 % manja od referentne. Vrijeme ustaljenja u ovom primjeru je oko 80 s, što je znatno veće od sustava sa običnim PID regulatorom.

$K$	$K_i$	Mrtva zona	Zasićenje
0.10	0.12	0 – 0.95	0 – 0.95
0.10	1.2		

Tab. 5.5. Vrijednosti unutar blokova u Simulinku.

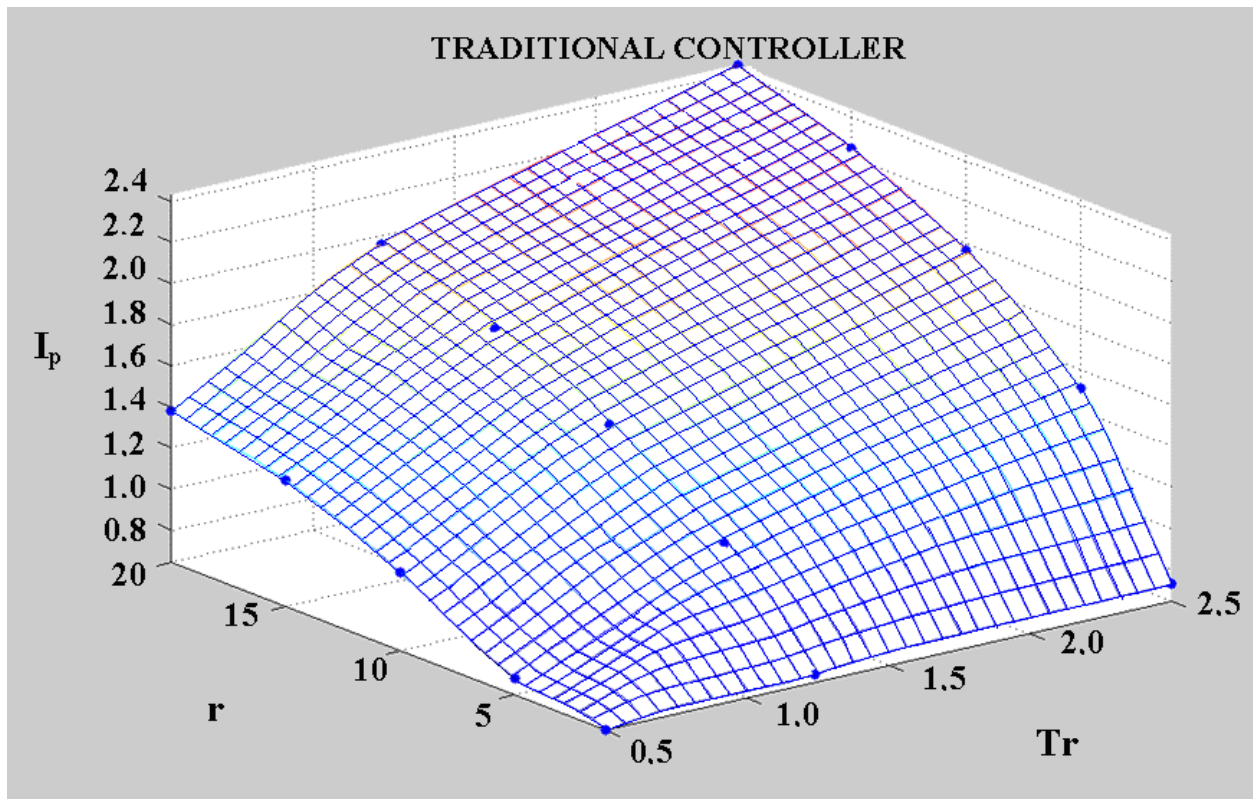
## 5.2. Analiza regulacije izolirane HE u Brazilu

Proučavani regulatori su: tradicionalni, PI, PID i PI-PD. Da bi se ustanovila kvaliteta rada regulatora uspostavlja se indeks performanse. Ovaj indeks ocjenjuje odstupanje brzine kada je sustav podvrgnut varijacijama tereta od strane rampe; od 0.779 do 1.009 p.u. unutar 10 s.

Odabrani indeks performanse ( $I_p$ ) je integral apsolutne greške (IAE, engl. *Integral of the Absolute Error*) gdje je apsolutna greška integral, unutar mjerenog razdoblja, razlike stvarne frekvencije i nazivne frekvencije.

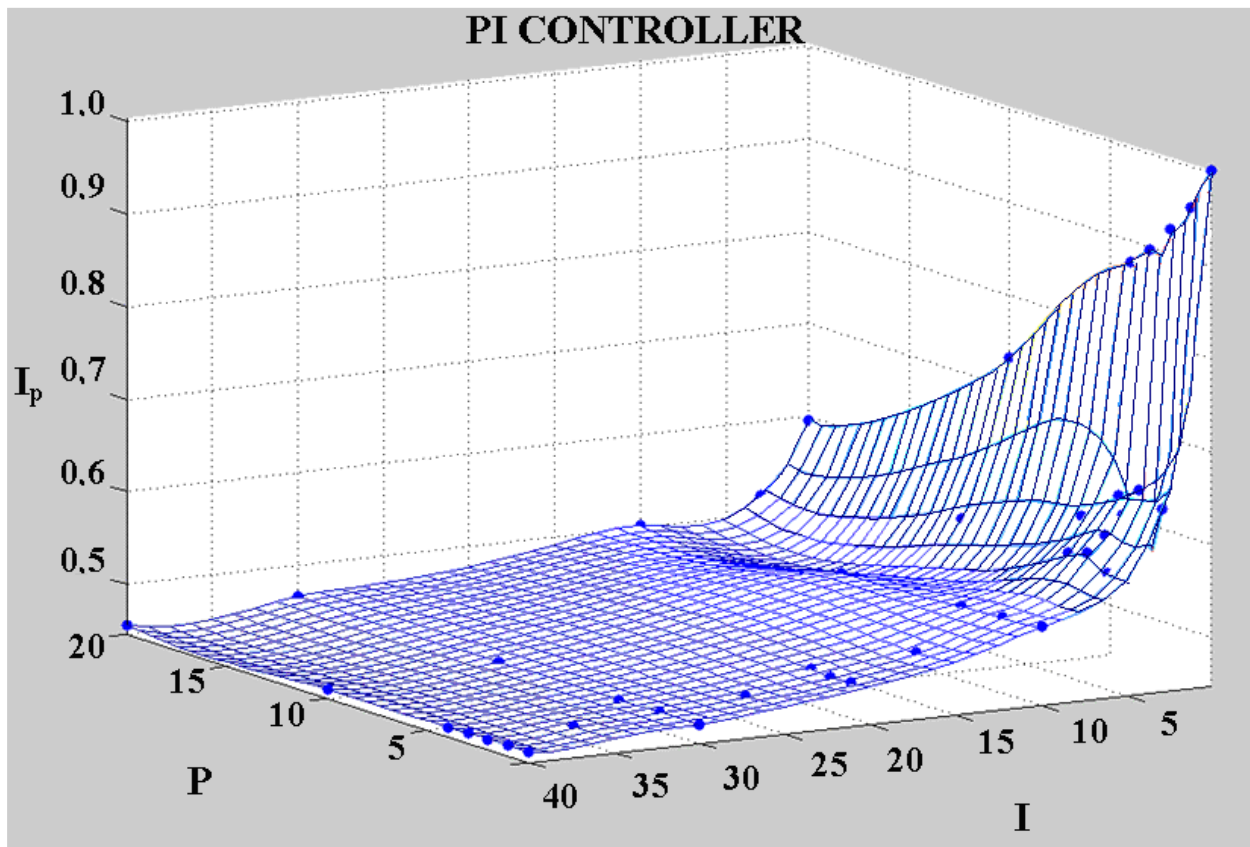
$$I_p = \int |\bar{\omega} - \bar{\omega}_0| dt \quad (5-1)$$

**Tradicionalni regulator** –  $T_r$  varira od 0.5 do 2.5, te  $r$  varira od 1.0 do 20. Vrijednosti izvan ovog razmjera ne poboljšavaju stabilnost sustava. Indeks performansi ukazuje da smanjenjem obaju vrijednosti  $I_p$  se smanjuje. Najmanja vrijednost iznosi  $I_p = 0.664$  za  $T_r = 0.5$  i  $r = 1.0$  m.



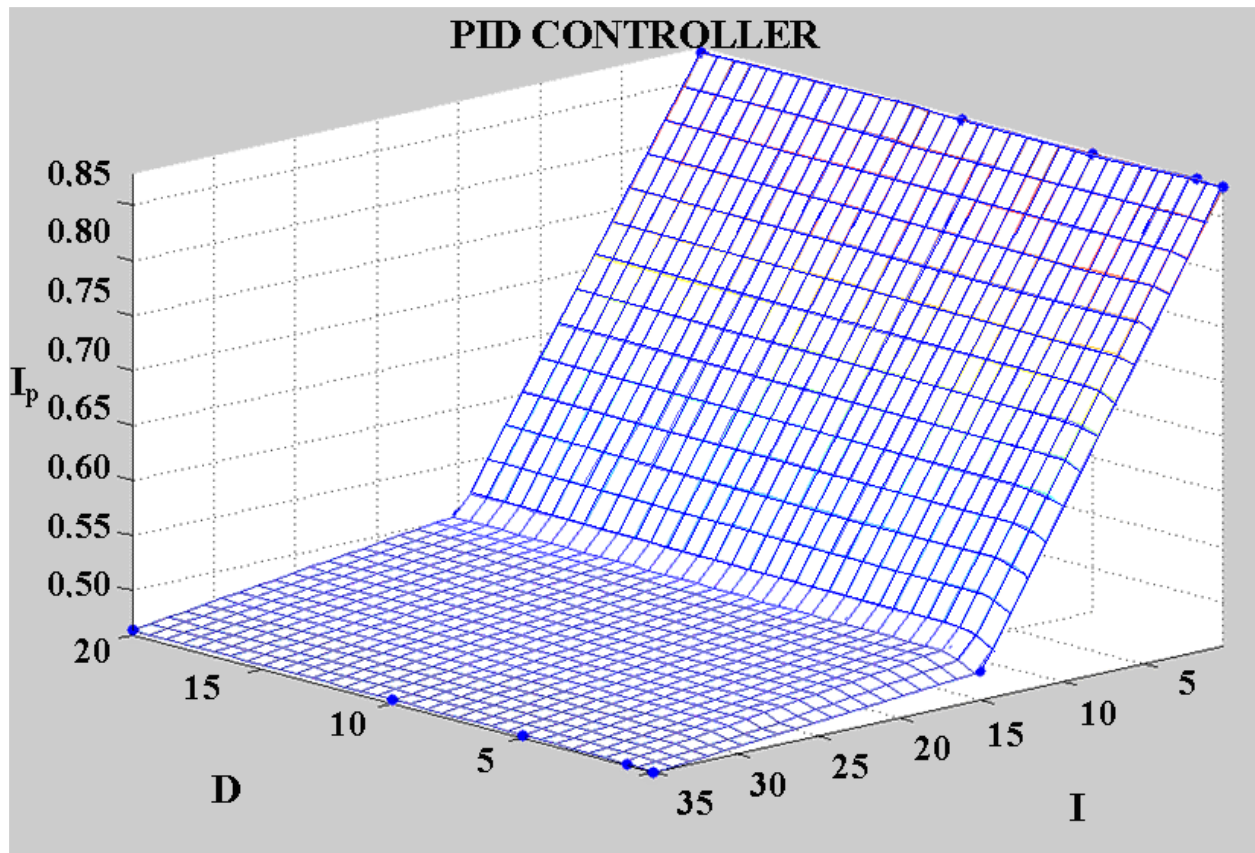
Sl. 5.8. Ideks performansi za tradicionalni regulator. [8]

**Proporcionalno integralni** –  $P = K_c$  se kreće od 0 do 20, dok  $I = K_c/T_I$  se kreće od 0 do 40. Najniža vrijednost PI regulatora  $I_p$  je  $I_p = 0.456$ , za  $P = 4.0$  i  $I = 40.0$ . Na slici se vidi kako se indeks smanjuje ukoliko se vrijednosti kreću između 0 i 25. Doduše, za vrijednosti iznad 25 smanjenje nije značajno, te za vrijednosti iznad 40 performansa sustava više ne ovisi o ovom parametru. Niske vrijednosti  $I$  parametra, te visoke vrijednosti  $P$  parametra podižu vrijednost indeksa. Dok visoke vrijednosti  $I$  parametra i niske  $P$  parametra ne ukazuju na veliki utjecaj rada sustava.



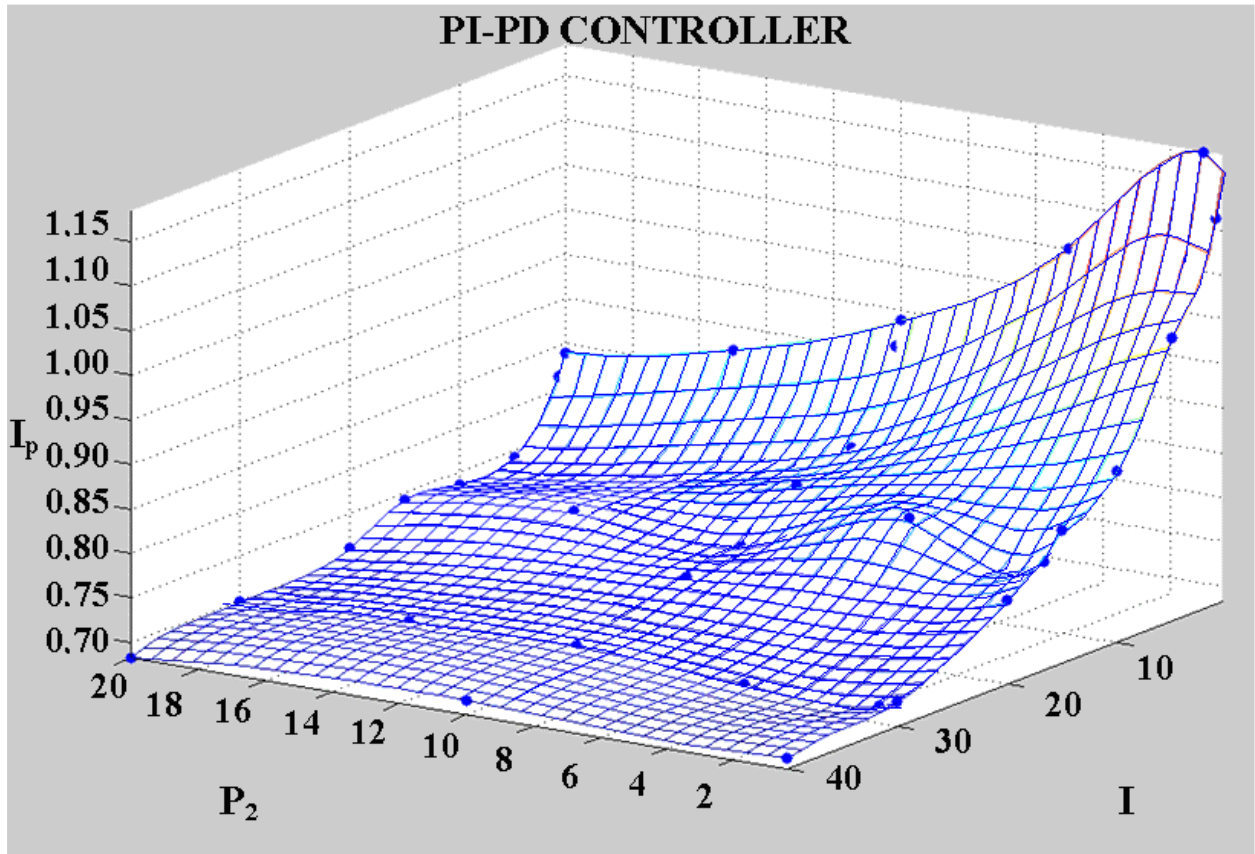
Sl. 5.9. Indeks performansi za PI regulator. [8]

**Proporcionalno integralni i derivacijski** –  $P = K_c$  i varira od 0 do 20;  $I = K_c/T_I$  varira od 0 do 40 te derivacijski  $D = K_c T_D$  varira od 0 do 20. Najbolji indeks je  $I_p = 0.457$ , za  $P = 2.0$ ,  $I = 40$ ,  $D = 1.0$ .



Sl. 5.10. Indeks performansi za PID regulator. [8]

**Proporcionalno integralni i proporcionalno derivacijski** –  $P_1$  se smatra kao 1.0, stoga nema proporcionalne dobiti za prvu etapu regulatora. Prilagodljivi parametri su  $P_2$ ,  $I$  i  $D$ .  $P_2$  varira od 0 do 20,  $I$  od 0 do 40, te  $D$  od 0 do 15. Za visoke vrijednosti  $D$ , sustav ima loš indeks, za veće vrijednosti od 15 sustav je oscilatoran te stabilnost nije postignuta. Najmanja vrijednost  $I_p = 0.657$  iznosi za parametre  $P_1 = 1.0$ ,  $D = 15$ ,  $P_2 = 5.0$  i  $I = 40$ .



Sl. 5.11. Indeks performansi za PI-PD regulator. [8]

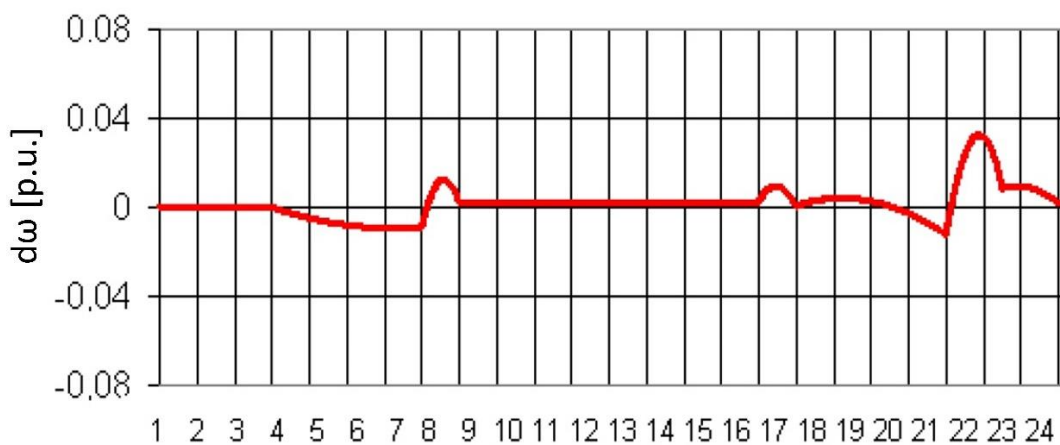
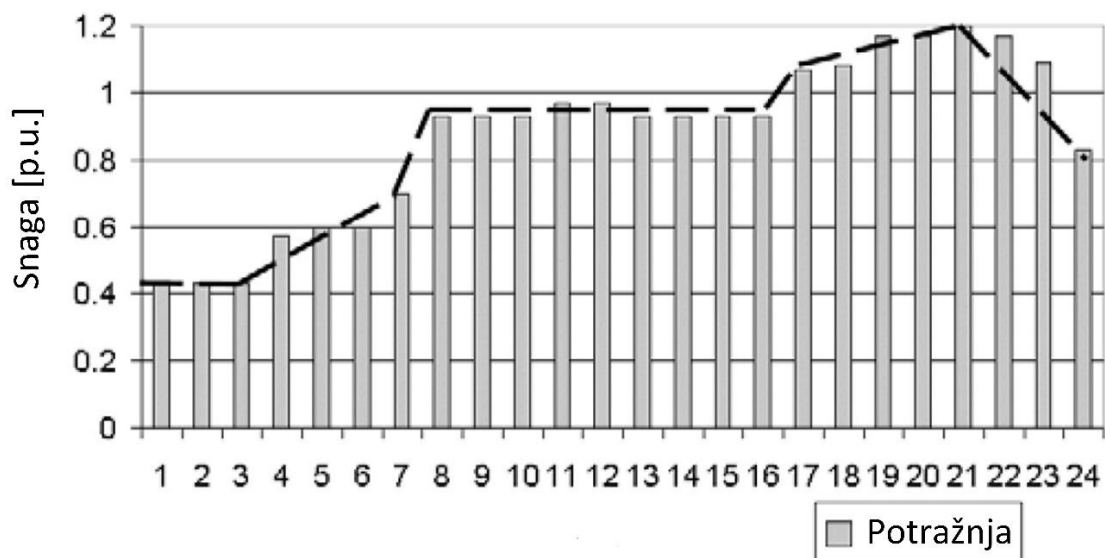


Nakon analize svih regulatora dolazi se do optimalnih vrijednosti. Najmanju vrijednost ima PI regulatora, dok najveću ima tradiciionalni.

Tradicionalni	PI	PID	PI-PD
0.664	0.456	0.457	0.658

Tablica 5.6. Optimalne vrijednosti indeksa performansi. [8]

Da bi se ustanovila stabilnost za PI regulator, uspoređuje se potražnja za energijom tijekom dana sa varijacijama brzine sustava kada je podvrgnut promjenama potražnje. Brzina se održava u granicama stabilnosti i sustav ima dobro dinamičko ponašanje korištenjem PI regulatora.



Sl. 5.12. Krivulja sustava kada je podvrgnut promjenama brzine zbog promjene potražnje energije. [8]

Prema Sl. 5.13. se vidi kako skokovi i promjene u sustavu se događaju kada se mijenja potražnja, što je snaga u određenom trenutku drugačija od snage u sljedećem trenutku, skokovi su u sustavu veći. [6]

## 6. ZAKLJUČAK

Ovim radom, kroz opis povijesti hidro – energije koja definira život čovjeka današnjice, opisuju se stari vodni kotači, moderne tehnologije, primjene i načini regulacije. Povodom evolucije tih starih uređaja tehnologija danas dolazi gdje jest i očigledno je da vuče korijenje iz istih naprava. Zahvaljujući posebnim ljudima i individualcima svijet je danas postao manji nego što je bio prije. Voda ima poseban značaj, daje nam život ali nam daje i potrebnu električnu energiju. Opisano je u detalje modeliranje dvaju hidroelektrana, kroz turbine, generatore, svojstva vode i cijelog vodenog stupa. Kroz sustave upravljanja dvaju elektrana u radu se vidi koji su bitni čimbenici koji mogu utjecati na učinkovitost postrojenja, a samim time i kako će utjecati na život čovjeka. Najčešće metode upravljanja su spomenute u radu te su na dvama primjera pokazane kako se te varijable ( $P - f$ ) i ( $Q - V$ ) mogu koristiti za trenutne potrebe mreže. Od svih tipova regulatora spomenutih, ne mora biti da je najkompliciraniji i najbolji. Kroz rad su testirani tradicionalni, PI, PID, PI-PD regulator za HE u Brazilu, te PID i protu – zamašni PI regulator za *Dinorwig* u UK. Za neke situacije i hidroelektrane PI regulator je dovoljan i služi odlično, te je pokazano u radu kroz simulaciju u programskom paketu *MatLAB* i *Simulink*.

## LITERATURA

- [1] G. Ardul Muonz-Hernandez, S. Ptrous Mansoor, D. Ieuan Jones, *Modelling and Controlling Hydropower Plants*, Springer-Verlag, London, 2013.
- [2] The NEED Project, *Hydropower*, P.O. Box 10101, Manassas, VA 20108, 24 – 27, [www.NEED.org](http://www.NEED.org), 2013.
- [3] K. Heinz Fasol, *A Short History of Hydropower Control*, IEEE Control Systems Magazine, 0272-1708/02, 68. – 76., University of Michigan, 2002.
- [4] M. Porter Peschka, *Hydroelectric Power – A Guide for Developers and Investors*, Stuttgart
- [5] K. Goldsmith, *Economic And Financial Analysis of Hydropower Projects*, Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic Engineering, 1993.
- [6] F. Carrasco, *Introduction to Hydropower*, The English Press, Delhi, 2011.
- [7] S. Currie, *What Is the Future of Hydropower*, ReferencePoint Press, Inc., San Diego, CA, 2013.
- [8] M.R. Gomes Zoby, J.I. Yanagihara, *Analysis of the Primary Control System of a Hydropower Plant in Isolated Mode*, Vol. XXXI, No. 1, Sao Paulo, 2009.
- [9] A.H. Glattfelder, L. Huser, P. Dorfler, J. Steinbach, *Automatic Control for Hydroelectric Power Plants*, Vol. XVIII, Control Systems, Robotics and Automation, Švicarska
- [10] C.C. Warnick, H.A. Mayo, J.L. Carson, L.H. Sheldon, *Hydropower Engineering*, Prentice-Hall, New Jersey, 1984.
- [11] S. Chhabra, D. Joshi, *Modeling And Analysis of Doubly Fed Induction Generators in Isolated Mode*, International Journal of Electronics, Electricac and Computational System, 130. – 134., Vol. 4, Special Issue, 2015.

## SAŽETAK

U radu je obavljena tematika povijesti hidro – energije te njezina izvodljivost. Kroz povijest korištenja energije vode spomenuti su problemi današnjice i očekivana budućnost. Detaljnije je obrađena tema modeliranja hidroelektrane kroz matematičke jednadžbe, uz primjer dvaju hidroelektrana. Razrađeni su primjeri najčešćih sustava upravljanja današnjice. Uz pomoć programskog paketa *MatLAB* i *Simulink* obavljena je analiza dvaju hidroelektrana uz različite postavbe regulatora.

*Ključne riječi:* hidroelektrana, modeliranje, regulator, upravljanje.

## ABSTRACT

This paper represents the theme of history of hydropower and its feasibility. Throughout the history of using water energy, problems of today and expectancy of future are mentioned. With example of two hydropower plants, modeling of the same plants is discussed in detail. Most common used control systems are elaborated. With help of *MatLAB* and *Simulink* software, analysis of two hydropower plants and their different control setups are discussed.

*Key words:* hydropower plant, modeling, governor, control.

## **ŽIVOTOPIS**

Ćosić Krešimir rođen je 9. rujna 1990. godine u Osijeku. Osnovnoškolsko obrazovanje stječe u O.Š. Ivana Filipovića u Osijeku i prilikom selidbe završava isto obrazovanje u O.Š. Tenja. Po završetku osnovne škole upisuje Prirodoslovno – matematičku gimnaziju (III. gimnazija) u Osijeku. Srednjoškolsko obrazovanje dovodi kraju 2009. godine, te iste godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij (smjer elektrotehnike) u Osijeku. Nakon 4 godine završava isti studij, te nastavlja obrazovanje upisivanjem sveučilišnog diplomskog studija (smjer elektroenergetike) 2013. godine. Prilikom završetka studija 2015. upisuje apsolventsku godinu te ljeto provodi radeći u Sjedinjenim Američkim Državama.