

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 1346

**Implementacija turbinske regulacije na NI  
cRIO platformi**

Tin Mohor

Zagreb, lipanj 2016.

Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Nikoli Miškoviću, Brodarskom Institutu i Dr. Sc. Krunoslavu Horvatu na pomoći i sugestijama prilikom izrade diplomskoga rada.

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Labview .....	2
3. Compact RIO.....	2
4. PLC (Programmable Logical Controller) .....	3
5. Model hidroelektrane .....	5
5.1. Turbinski regulator .....	6
5.2. Elektrohidraulički aktuator .....	9
5.3. Turbina.....	10
5.4. Sustav dovoda vode.....	13
5.5. Agregat A uz generatorski prekidač .....	17
5.6. Opterećenje na generatorskom prekidaču .....	18
6. Hardware in the loop simulacija.....	19
7. Regulator .....	22
7.1. Regulator otvora privodnog kola .....	23
7.2. Regulator brzine.....	26
7.3. Regulator snage.....	27
8. Upravljanje regulatorom.....	30
9. Testiranje.....	31
9.1. Test 1.....	32
9.2. Test 2.....	35
9.3. Test 3.....	36
9.4. Test 4.....	38
Zaključak.....	41
Literatura .....	43
Sažetak .....	44

Summary..... 45

## **1. Uvod**

Za potrebe ovog diplomskog koristila se Hidroelektrana Golubić koja se nalazi na rijeci Butišnici, pritoci rijeke Krke. Sadrži dvije Francisove turbine od 3,75 MW, dok je volumni protok 14,5 m<sup>3</sup>/s, a raspoloživi konstruktivni pad vode iznosi 59 metara. Godišnje proizvede oko 21 GWh električne energije. HE Golubić je derivacijska hidroelektrana te se voda do strojarnice dovodi kanalom i visokotlačnom cijevi, a strojarnica je udaljena od brane. Sagrađena je 1981. godine te je treća po veličini hidroelektrana na rijeci Krki.

Kako bi se moglo upravljati elektroenergetskim sustavom na razini države potrebno je znati upravljati svakim njegovim dijelom posebno. Hidroelektrane godišnje proizvedu 29% električne energije preuzete u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske te je vrlo važno dobro upravljati njima kako bi se osigurala konstantna i kvalitetna opskrba električne energiju u Hrvatskoj. U ovom će se radu objasniti način na koji je napravljen i na koji radi sustav turbinske regulacije Hidroelektrane Golubić.

## 2. Labview

Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) je grafički programski jezik za dizajniranje sustava. Tvrtka National Instruments razvila ga je 1986. godine za Macintosh, te se uglavnom koristi za industrijsku automatizaciju, prikupljanje podataka i kontrolu instrumenata. Programi u Labview-u se nazivaju VI („virtual instruments“). Za programiranje u Labview-u koristi se blok-dijagram, gdje se povezuju unaprijed definirani funkcionalni blokovi kako bi ostvarili funkciju određenog algoritma. Unutar blok-dijagrama koristi se „drag-and-drop“ metoda koja uvelike olakšava programiranje te je moguće programirati u standardnim programskim jezicima poput C-a i Matlab. Interaktivna kontrola izvršenja korisničkog programa omogućuje front-panel. Na njemu se zadaju ulazne varijable te vidimo iznose izlaznih varijabli. Također je moguće iscrtati graf te spremiti podatke na disk.

U radu se koristi „Control Design and Simulation Module“ koji omogućava dizajn kontrolera, implementaciju sustava kontrole i opis dinamičkih sustava. Također nudi i testiranje u stvarnom vremenu te „Hardware in the loop“ testiranje.

## 3. Compact RIO

Compact RIO („reconfigurable input/output“) je „real-time“ industrijski kontroler kojeg je proizvela kompanija National Instruments. cRIO sustav se sastoji od ulazno/izlaznih modula, koji mogu biti analogni ili digitalni, *real-time* kontrolera i FPGA modula. Za komunikaciju s okolinom koristi *ethernet* vezu, a za uspješnu komunikaciju potrebno je definirati IP adresu. cRIO sadrži mikroprocesor koji služi za implementaciju zadanih algoritama, a ima razne frekvencije. FPGA modul se koristi pri implementaciji visokih performansi pri obradi podataka te kako bi ubrzali zadani algoritam. FPGA se može zasebno programirati i povezan je s *real-time* modulom. NI cRIO se koristi kao industrijska upravljačka jedinica u sustavima gdje su veličina upravljačke jedinice i robusnost veoma važni. Compact RIO podržava Labview

programsko okruženje, ali se također može programirati u C, C++ i Java programskim jezicima.

U radu se koristi NI cRIO 9014, napajan naponskim pretvaračem „Hewlett Packard DC power supply“ postavljenim na 24V, spojen na 8-modularnu šasiju za ulazno-izlazne module. Potrebni moduli su analogni ulaz i izlaz te digitalni izlaz. Korišten je analogni ulazni modul NI 9205, analogni izlazni modul NI 9263 te digitalni izlazni modul NI 9476.



Slika 1. NI cRIO platforma <sup>1</sup>

#### 4. PLC (Programmable Logical Controller)

PLC, programirajući logički kontroler, se koristi za automatizaciju industrijskih postrojenja, a razvili su ga inženjeri General Motors-a 1968. godine, kada su tražili alternativu tadašnjim relejnim kontrolnim sustavima. Glavne značajke PLC-a su jednostavno programiranje, programske izmjene bez sistemskih intervencija, jednostavno i jeftino održavanje, male dimenzije, niska cijena i činjenica da je pouzdaniji od relejnih kontrolera. Najvažniji dijelovi PLC-a su mikroprocesor s dodatnim električnim sklopovima, sklop za opskrbu električnom energijom procesora, u kojem se upravljački istosmjerni

<sup>1</sup> [http://www.ni.com/cms/images/devzone/pub/Q109\\_INL\\_page18\\_fig1.jpeg](http://www.ni.com/cms/images/devzone/pub/Q109_INL_page18_fig1.jpeg)

napon od 24V pretvara u logički napon od 5V, kvarc za davanje takta procesoru, prekidač za uključivanje i isključivanje rada procesora te memorija (sistemska, radna i programska). PLC je zasnovan na Booleovoj algebri i može primiti vrijednosti ulaza i izlaza 0 ili 1. Preko ulaznog modula se ulazni signali pretvaraju u signale koje PLC može obraditi.

Prema DIN EN61131-1 (1994.) programabilni logički upravljač (kontroler) jest digitalni elektronički sustav za uporabu u industrijskom okolišu s programabilnom memorijom za internu pohranu primjeni orijentiranih upravljačkih naredbi kod implementiranja specifičnih funkcija kao što su npr. logičko upravljanje, slijedno upravljanje, funkcije odbrojavanja, funkcije brojenja i aritmetičke funkcije, Osnovna namjena PLCa je upravljanje, putem digitalnih ili analognih ulaznih i izlaznih signala, različitim vrstama strojeva ili procesa.

PLC se može programirati na tri načina, kao blok dijagram, ladder dijagram te STL (statement list) listia izjava. U Europi je raširena uporaba blok dijagrama dok se u Americi više koristi ladder dijagram.





Slika 2. Siemens S7-300 PLC <sup>2</sup>

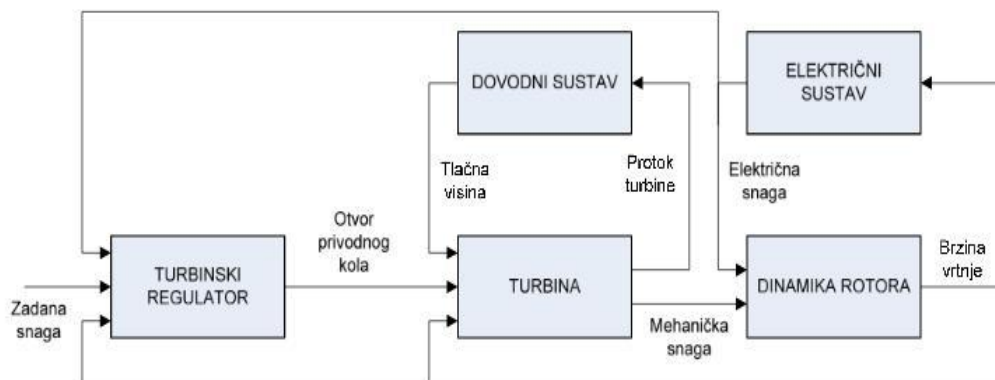
Za potrebe ovog rada korišten je Siemensov PLC S7-300 na kojem se nalazi regulator turbine Hidroelektrane Golubić. Regulator je isprogramiran u Siemensovom Simatic Step7 programskom okruženju koje je razvijeno posebno za programiranje PLC-a. Također je korišten Simatic pannel za prikazivanje HMI-a (Human Machine Interface), na kojem se nalaze tipke za paljenje i gašenje postrojenja, unos parametara regulatora te unos zadanog otvora privodnog kola. Preko HMI-a se također može uključiti i isključiti generatorski prekidač kojim se hidroelektrana spaja na električnu mrežu

## 5. Model hidroelektrane

Model hidroelektrane napravljen je u programskom okruženju Labview. Budući da je vodna turbina izrazito nelinearni uređaj u ispitivanjima se koristi pojednostavljeni model koji dobro opisuje ponašanje turbine oko nazivne brzine. Za HIL ispitivanja potrebno je dobro opisati pokretanje i zaustavljanje turbine te sinkronizaciju i velike poremećaje u radu turbine. Također je bitno

<sup>2</sup> [http://firelec.com/webroot/media/System\\_S7\\_300.jpg](http://firelec.com/webroot/media/System_S7_300.jpg)

da su prijelazi između navedenih područja što glađi. Za HIL ispitivanja koristi se model bez regulatora, dok se u off-line modu koristi regulator kako bi ga mogli dizajnirati i analizirati.



Slika 3. Model sustava turbinske regulacije <sup>3</sup>

Na slici 3. nalazi se blok shema modela hidroelektrane koja se sastoji od tri glavna dijela: regulator, turbina s dovodom vode te agregat i opterećenje uz generatorski prekidač. Simulacijski model mora pokrivati što veći spektar mogućih operacija hidroelektrane. Parametri modela moraju biti precizno određeni kako bi dobili što bolji regulator pri HIL ispitivanjima.

### 5.1. Turbinski regulator

Kako bi se regulirala brzina vrtnje ili snaga agregata, mijenja se otvor privodnog toka. Današnji regulatori se sastoje od elektroničkog dijela s upravljačkim algoritmom, koji se pokreće na digitalnom procesoru, te hidrauličkog dijela koji se ponaša onako kako upravljački signal zahtjeva, to jest sustav upravlja hidrauličkim servomotorom.

Zbog dva različita režima rada hidroelektrane, moraju se koristiti dva različita načina upravljanja elektranom te se turbinski regulator sastoji od dva paralelno povezana regulatora spojena na regulator otvora privodnog kola. Kada je agregat u otočnom režimu rada potrebno je regulirati brzinu, da bi

<sup>3</sup> Bakarić V., Mišković I., Horvat K., HIL ispitivanja turbinske regulacije HE Lečće, Cavtat, 2011., slika 2.

imali konstantnu frekvenciju mreže, dok je u slučaju mrežnog rada potrebno regulirati snagu agregata. Tada frekvenciju regulira sama mreža zbog hipoteze beskonačne električne mreže. Zbog toga se koristi dva paralelno povezana regulatora. U svakom trenutku se koristi jedan od njih dok drugi također radi kako bi se, u slučaju prelaska iz jednog režima u drugi, postigao gladak prijelaz. U modelu regulatora koriste se razni limitatori, zaštite, rampe, filtri te ograničenja signala kako bi model više sličio stvarnom regulatoru. Stvarni regulator još sadrži ručne i pomoćne grane upravljanja te zatvaranje otvora privodnog kola u slučajevima kvara ili nekih nepredvidivih situacija.

Regulator brzine vrtnje je napravljen kao PID regulator te se može opisati sljedećom jednačinom:

$$\omega_{ef} = \left( \omega_{ref} - \frac{T_{F\omega inv}}{T_{F\omega inv} + S} \cdot \frac{T_{F\omega inv}}{T_{F\omega inv} + S} \cdot \omega_N \right) \cdot \left[ K_{P\omega} + K_{I\omega} \cdot \frac{1}{S} + \frac{K_{D\omega} \cdot S}{T_{D\omega} \cdot S + 1} \right], \quad (1)$$

gdje je  $\omega_{ref}$  zadana referentna brzina okretaja turbine,  $\omega_N$  mjerena brzina okretaja turbine,  $T_{F\omega inv}$  invertirana vremenska konstanta filtera mjerenja brzine,  $K_{P\omega}$  pojačanje proporcionalne grane,  $K_{I\omega}$  pojačanje integralne grane,  $K_{D\omega}$  pojačanje derivacijske grane,  $T_{D\omega}$  vremenska konstanta realnog derivatora, te  $y_{ref}$  referentna vrijednost otvora dobivena kao izlazni signal regulatora brzine. Mjerena brzina se filtrira s dva nisko-propusna filtra, napravljena pomoću funkcije prvog reda.

Drugi je regulator napravljen kao PI regulator te regulira snagu na agregatu, a opisuje se sljedećom jednačinom:

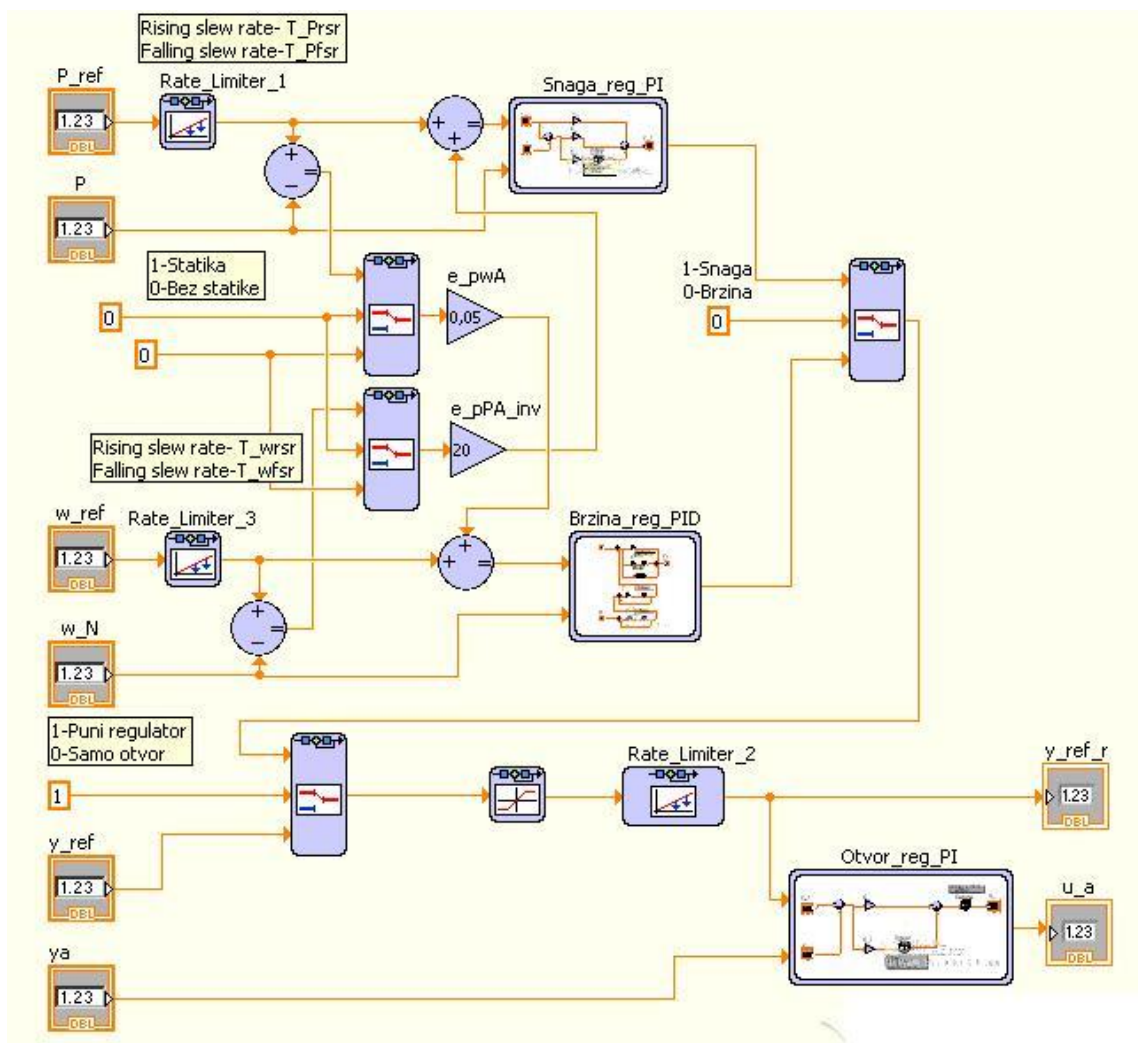
$$y_{ref} = P_{ref} \cdot K_{PFp} + (P_{ref} - P) \cdot \left( K_{PP} + K_{IP} \cdot \frac{1}{S} \right), \quad (2)$$

gdje je  $P_{ref}$  referentna snaga agregata,  $K_{PFp}$  Pojačanje FF-grane,  $K_{PP}$  pojačanje proporcionalne grane,  $K_{IP}$  pojačanje integralne grane te  $y_{ref}$  referentna vrijednost otvora dobivena kao izlazni signal regulatora snage.

Iza regulatora brzine i snage potrebno je postaviti PID regulator upravljačkog signala za elektrohidraulički aktuator privodnog kola koji se može opisati jednadžbom:

$$u_a = (y_{ref} - y_a) \cdot \left( K_{py} + K_{Iy} \cdot \frac{1}{s} \right), \quad (3)$$

gdje je  $u_a$  upravljački signal za elektrohidraulički aktuator,  $y_a$  mjereni otvor privodnog kola,  $K_{py}$  pojačanje proporcionalne grane,  $K_{Iy}$  pojačanje integralne grane. Izlazni se signal ograničava kako bi izbjegli naglo zatvaranje otvora privodnog kola te kako bi model bio realniji.



Slika 4. Model regulatora turbine

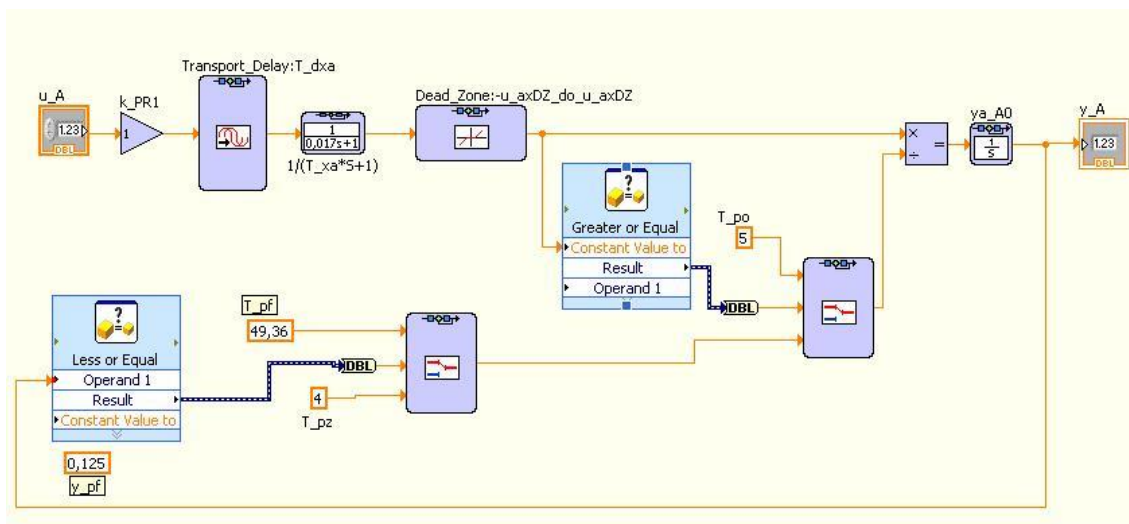
## 5.2. Elektrohidraulički aktuator

Elektrohidraulički aktuator pomoću zakretnih lopatica otvara i zatvara otvor privodnog kola, regulira protok vode kroz turbinu te usmjerava vodu na lopatice turbine pod najpovoljnijim kutom, a sastoji se od proporcionalnog razvodnika i hidrauličkog cilindra. Privodno kolo se sastoji od dva obruča s 20 do 32 hidraulički profiliranih lopatica. Zakretanje lopatica se ostvaruje zakretanjem regulacijskog prstena pomoću servomotora.

Kako bi dobili otvor privodnog kola potrebno je upravljački signal dovesti na proporcionalni razvodnik koji ima integralno ponašanje, kašnjenje te svoje pojačanje, a ponaša se kao sustav prvog reda s kašnjenjem. Potom je potrebno odrediti vrijeme zatvaranja ili otvaranja privodnog kola koje ovisi o otvorenosti privodnog kola. Također, ovisno o predznaku upravljačkog signala određuje se da li se privodno kolo treba otvoriti ili zatvoriti. Postoje dva različita vremena zatvaranja.  $T_{pf}$ , prigušeno vrijeme zatvaranja, koji se primjenjuje kada je iznos otvora  $y_p$  manji od  $y_{pf}$ , što znači da se nalazi u području blizu nule. Drugo vrijeme zatvaranja je  $T_{pz}$  koje se koristi kada je otvor privodnog toka u osnovnom radnom području. Budući da model turbine radi uz drugo normiranje otvora potrebno je preskalirati otvor, tako da je:

$$y_A = \frac{y_P}{y_{P\_fl}}. \quad (4)$$

Također, iz razloga što otvorenost privodnog kola može biti između 0% i 100% na integratoru je potrebno postaviti limitator kako bi izlazni signal bio između 0 i 1.



Slika 5. Pojednostavljena shema elektrohidrauličkog akuatora

### 5.3. Turbina

HE Golubić ima dvije Francisove turbine svaka sa 3,75 MW snage. Francisova turbina koristi se na srednjotlačnim hidroelektranama gdje je pad vode od 40 do 200 metara i ima veliki koeficijent iskoristivosti, oko 90%. Promjer rotora može iznositi između 1 i 10 metara, a broj okretaja rotora od 83 do 1000 okretaja u minuti. Voda u radno kolo, koje se sastoji od 12 do 17 čvrsto fiksiranih lopatica, ulazi radialno, a izlazi aksijalno. Na izlazu se nalazi difuzor kroz koji voda odlazi u odvodni kanal turbine. Difuzorom se smanjuju gubici turbine koji su povezani s kinetičkom energijom vode. Francisova turbina je najčešći tip turbine koji se koristi u hidroelektranama.

Kako bi se vjerno opisalo ponašanje protoka i visine vode moramo u obzir uzeti i ponašanje druge turbine. Za opis turbina koristi se pojednostavljeni IEEE model. Protok svake se opisuje nelinearnim jednadžbama 1 i 2.

$$q_A = y_A \sqrt{h_A} \quad (5)$$

$$q_B = y_B \sqrt{h_B} \quad (6)$$

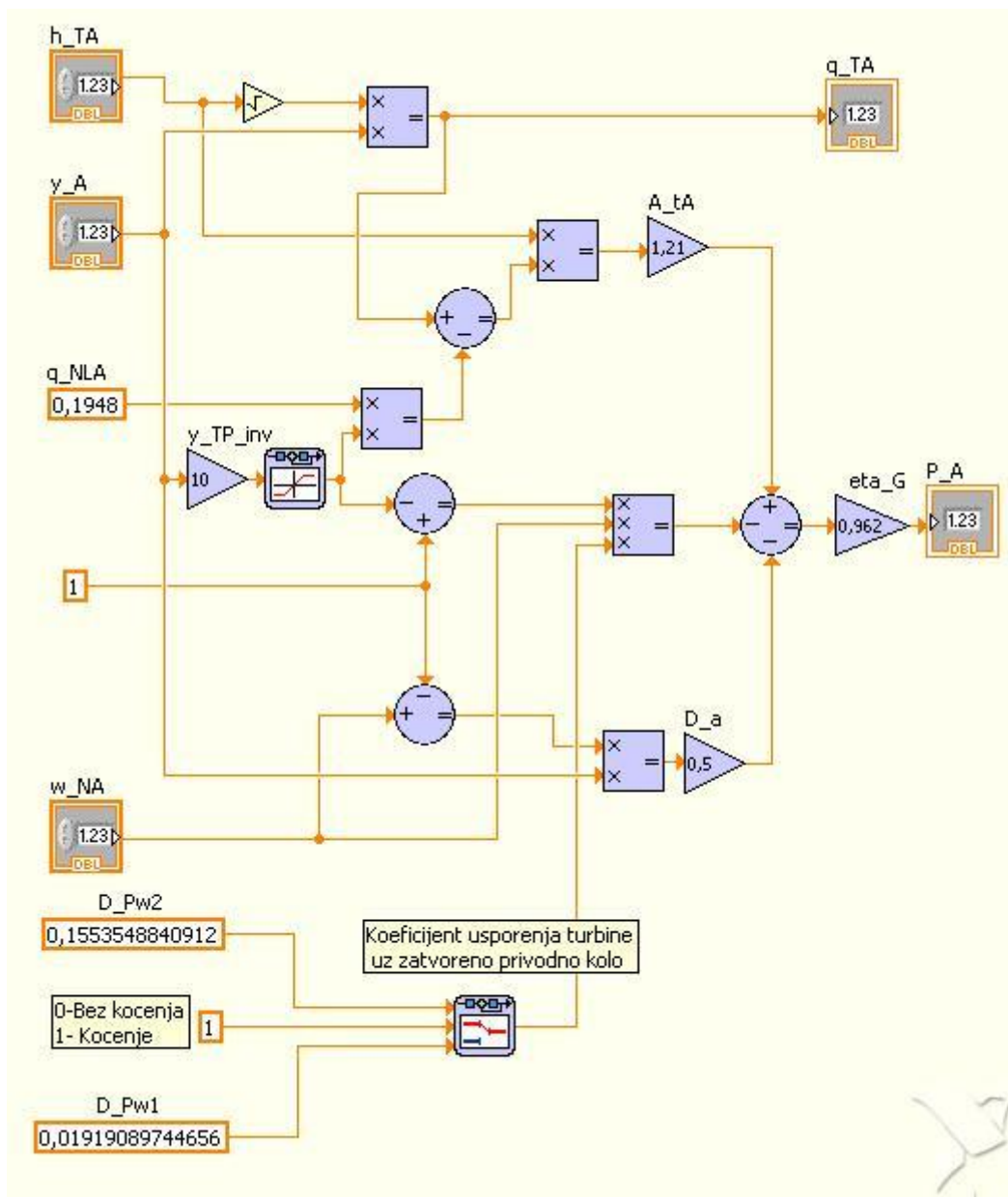
gdje su  $q_A$  i  $q_B$  protoci na turbinama A i B,  $y_A$  i  $y_B$  otvor privodnog kola turbina A i B te  $h_A$  i  $h_B$  tlačna visina.

Izlazna mehanička snaga se računa samo na upravljanoj turbini te je njezino ponašanje izrazito nelinearno. Pri računanju mehaničke snage moramo u obzir uzeti gubitke na turbini te koeficijent usporenja turbine uz zatvoreno privodno kolo,  $D_{Pw1}$  i  $D_{Pw2}$ . Prvi se koristi u slučaju kada turbina radi u otočnom načinu rada, dok se drugi koeficijent koristi kada je turbina spojena na mrežu te ona koči turbinu zbog hipoteze beskonačne električne mreže.

Za izračun mehaničke snage koristimo sljedeću formulu:

$$P_A = \left\{ \left[ A_{TA} \cdot h_{TA} \cdot (q_{TA} - q_{NLA} \cdot (y_A \cdot y_{TP_{inv}})) \right] - \left[ \omega_{NA} \cdot (\omega_B - y_A \cdot y_{TP_{inv}}) \cdot D_{Pw} \right] - \left[ D_A \cdot y_A \cdot (\omega_{NA} - \omega_B) \right] \right\} \quad (7)$$

gdje je  $P_A$  mehanička snaga turbine,  $A_{TA}$  protok kroz turbinu,  $h_{TA}$  tlačna visina,  $q_{TA}$  protok,  $q_{NLA}$  protok praznog hoda,  $y_A$  otvor privodnog kola,  $y_{TP_{inv}}$  inverz pojačanja otvora privodnog toka koji iznosi,  $\omega_{NA}$  brzina vrtnje agregata,  $\omega_B$  nominalna brzina agregata koja uobičajeno iznosi 1,  $D_{Pw}$  koeficijent usporenja turbine uz zatvoreno privodno kolo te  $D_A$  koeficijent prigušenja turbine.



Slika 6. Model upravljanje turbine

Ovaj model i pri malim brzinama i otvorima agregata daje dobar odziv jer omogućuje glatki prijelaz između modela za nominalnu snagu agregata i modela za područje otvora oko nule. Na kraju, da bi se dobio iznos mehaničke snage, potrebno je pomnožiti dobivenu mehaničku snagu turbine s koeficijentom gubitaka turbine  $\eta$ , koji iznosi 0,96. Tada mehanička snaga iznosi:

$$P_m = \eta_g \cdot P_{mt}. \quad (8)$$



#### 5.4. Sustav dovoda vode

Sustav dovoda vode HE Golubić, zbog malog prirodnog pada, koristi tlačni cjevovod koji dovodi vodu do strojarnice te je u tom slučaju strojarnica potpuno odvojena od brane. Kako bi tlačni cjevovod bio što kraći, a brzina vode na ulazu u turbinu veća, potrebno je postaviti tlačni cjevovod na što veći nagib. Voda se do tlačnog cjevovoda dovodi kanalom od brane, bez velikog nagiba. Također se u obzir moraju uzimati mnoga prigušenja i vremenske konstante ubrzanja vode. Farancisova turbina koristi spiralnu komoru kako bi se što ravnomjernije rasporedio protok vode po turbini što osigurava podjednako opterećenje po obodu radnog kola te sprječava asimetričnost koja dovodi do pojave vibracija i sila u turbini.

Zbog svih navedenih problema sustav dovoda vode HE Golubić je vrlo složen te se opisuje sa šesnaest diferencijalnih jednačbi. Četiri jednačbe potrebne za izračun tlačne visine vode na turbini A to su:

$$\dot{h}_{TA} = \kappa_{ZS4} \cdot (q_{ZA1} - q_{TA}), \quad (9)$$

$$\dot{q}_{ZA1} = T_{WZinvS2} \cdot [-h_{TA} - (D(q_{ZA}) + |q_{ZA}| \cdot q_{ZA} \cdot k_{ZS2}) + h_{ZA1}], \quad (10)$$

$$\dot{h}_{ZA1} = \kappa_{ZS2} \cdot (q_{ZA0} - q_{ZA1}), \quad (11)$$

$$\dot{q}_{ZA0} = T_{WZinvS2} \cdot [-h_{ZA1} - (D(q_{ZA0}) + |q_{ZA0}| \cdot q_{ZA0} \cdot k_{ZS2}) + h_{ce}]. \quad (12)$$

Gdje je  $h_{TA}$  tlačna visina vode na turbini A,  $q_{TA}$  protok vode na turbini A,  $\kappa_{ZS4}$  i  $\kappa_{ZS2}$  parametri širenja tlačnog vala,  $T_{WZinvS2}$  vremenska konstanta ubrzanja vode i  $k_{ZS2}$  koeficijent gubitaka. Funkcija  $D(q)$  je prigušenje za mali protok cjevovoda te se računa formulom:

$$h = \text{sign}(q) \cdot (q \cdot a_{GC1} + a_{GC2}), \quad (13)$$

te je limitiran između 0 i  $h_{GC0}$  koji je gornji limit gubitaka za mali protok cjevovoda, dok je  $q$  ulazni protok,  $a_{GC1}$  linearni koeficijent gubitaka,  $a_{GC2}$  slobodni koeficijent gubitaka.

Četiri jednačbe potrebne za izračun tlačne visine vode na turbini B su:

$$\dot{h}_{TB} = \kappa_{ZS4} \cdot (q_{ZB1} - q_{TB}) \quad (14)$$

$$\dot{q}_{ZB1} = T_{WZinvS2} \cdot [-h_{TB} - (D(q_{ZB}) + |q_{ZB}| \cdot q_{ZB} \cdot k_{ZS2}) + h_{ZB1}] \quad (15)$$

$$\dot{h}_{ZB1} = \kappa_{ZS2} \cdot (q_{ZB0} - q_{ZB1}) \quad (16)$$

$$\dot{q}_{ZB0} = T_{WZinvS2} \cdot [-h_{ZB1} - (D(q_{ZB0}) + |q_{ZB0}| \cdot q_{ZB0} \cdot k_{ZS2}) + h_{ce}]. \quad (17)$$

Gdje je  $h_{TB}$  tlačna visina vode na turbini B,  $q_{TB}$  protok vode na turbini B.

Ostale jednačbe koriste se za izračunavanje gubitka cjevovoda i ostalih gubitaka unutar dovodnog sustava.

$$\dot{h}_{ce} = \kappa_{CZekv} \cdot (q_{ce} - q_{ZA0} - q_{ZB0}) \quad (18)$$

$$\dot{q}_{ce} = T_{WCinvS2} \cdot [-h_{ce} - (D(q_{ce}) + |q_{ce}| \cdot q_{ce} \cdot k_{CS2}) + h_{C3}] \quad (19)$$

$$\dot{h}_{C3} = \kappa_{CS43} \cdot (q_{C2} - q_{ce}) \quad (20)$$

$$\dot{q}_{C2} = T_{WCinvS} \cdot [-h_{C3} - (D(q_{C2}) + |q_{C2}| \cdot q_{C2} \cdot k_{CS}) + h_{C2}] \quad (21)$$

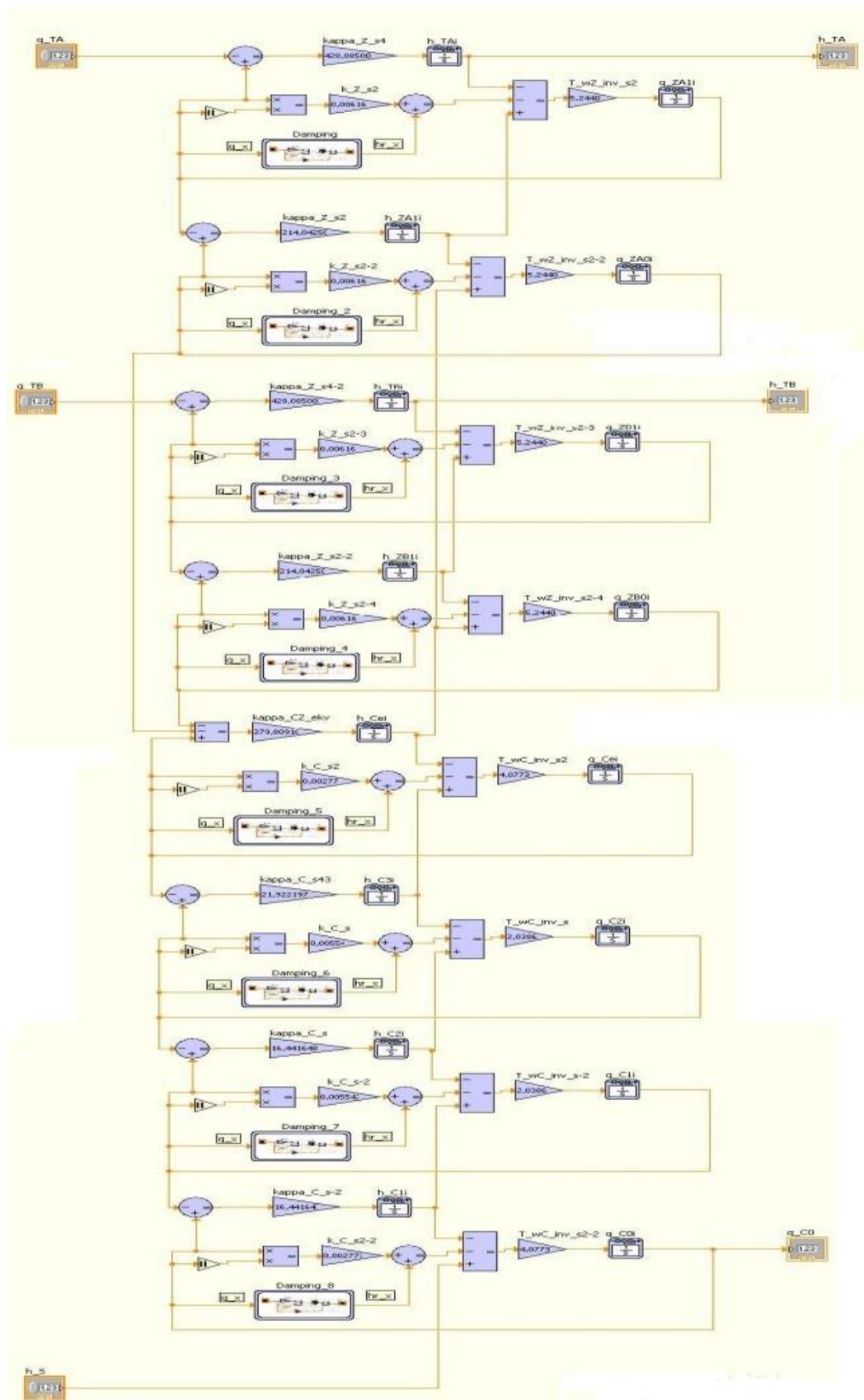
$$\dot{h}_{TA} = \kappa_{ZS4} \cdot (q_{ZA1} - q_{TA}) \quad (22)$$

$$\dot{q}_{ZA1} = T_{WCinvS} \cdot [-h_{C2} - (D(q_{C1}) + |q_{C1}| \cdot q_{C1} \cdot k_{CS}) + h_{C1}] \quad (23)$$

$$\dot{h}_{TA} = \kappa_{ZS4} \cdot (q_{ZA1} - q_{TA}) \quad (24)$$

$$\dot{q}_{ZA1} = T_{WCinvS2} \cdot [-h_{C1} - (D(q_{C0}) + |q_{C0}| \cdot q_{C0} \cdot k_{CS2}) + h_S] \quad (25)$$

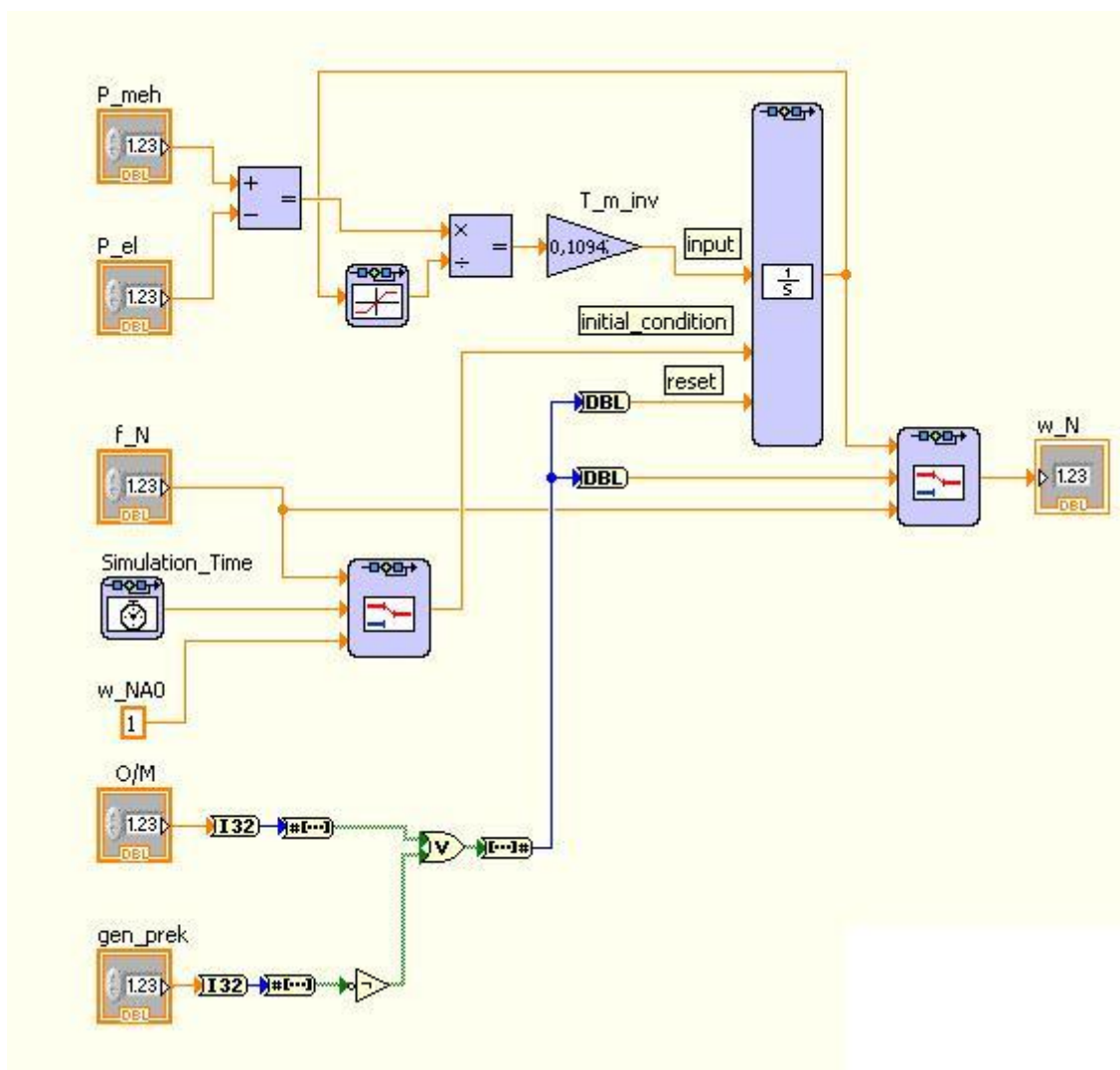
Gdje su  $\kappa_{CZekv}$ ,  $\kappa_{CS43}$  i  $\kappa_{ZS4}$  parametri širenja tlačnog vala,  $T_{WCinvS}$  i  $T_{WCinvS2}$  vremenske konstanta ubrzanja vode,  $k_{CS}$  i  $k_{CS2}$  koeficijent gubitaka cjevovoda, koji ovise o geometrijskim odnosima i konstrukciji dovodnog sustava dok je  $h_s$  statička tlačna visina vode te ovisi o razini vode u akumulaciji i promatra se kao konstanta. Također se moraju postaviti početna stanja integratora kako bi izbjegli oscilatorni odziv sustava.



Slika 7. Model dovoda vode HE Golubić

### 5.5. Agregat A uz generatorski prekidač

Generator može raditi u dva različita načina. Ukoliko je generator spojen na mrežu, tada se smatra da je utjecaj generatora na mrežu zanemariv zbog hipoteze beskonačne električne mreže te, preračunamo li frekvenciju mreže u ekvivalentnu brzinu vrtnje agregata vrijedi  $\omega_n = f_n$ , što znači da brzinu vrtnje generatora određuje mreža. Električna snaga hidroelektrane je u tom slučaju jednaka mehaničkoj snazi umanjenom za gubitke u pretvorbi.



Slika 8. Labview model agregata

U drugom slučaju agregat je jedini proizvođač električne energije spojen na mrežu te on diktira frekvenciju, to jest nalazi se u otočnom načinu rada. Tada se brzina vrtnje agregata može opisati jednadžbom:

$$\frac{d\omega_N}{dt} = \frac{1}{T_m} \cdot \frac{P_{meh} - P_{el}}{\omega_N}, \quad (26)$$

gdje je  $\omega_N$  brzina vrtnje agregata,  $P_{meh}$  mehanička snaga agregata,  $P_{el}$  električna snaga agregata te  $T_m$  mehanička vremenska konstanta agregata, a ovisi njegovom momentu inercije. Jednadžba također vrijedi i kada je generator odspojen sa mreže te je električna snaga  $P_{el} = 0$ , kao i pri kočenju agregata kada je  $P_{meh} < 0$ . Pri malim se brzinama vrtnje  $\omega_N$  nazivnik jednadžbe mora se ograničiti kako bi izbjegli dijeljenje s nulom.

## 5.6. Opterećenje na generatorskom prekidaču

Električna snaga generatora također ovisi o načinu rada. Kada je generator odspojen od mreže proizvedena električna energija jednaka je nuli.

U slučaju otočnog režima rada električna snaga je zbroj snage vanjskog tereta spojenog na agregat i utjecaja prigušenja mreže.

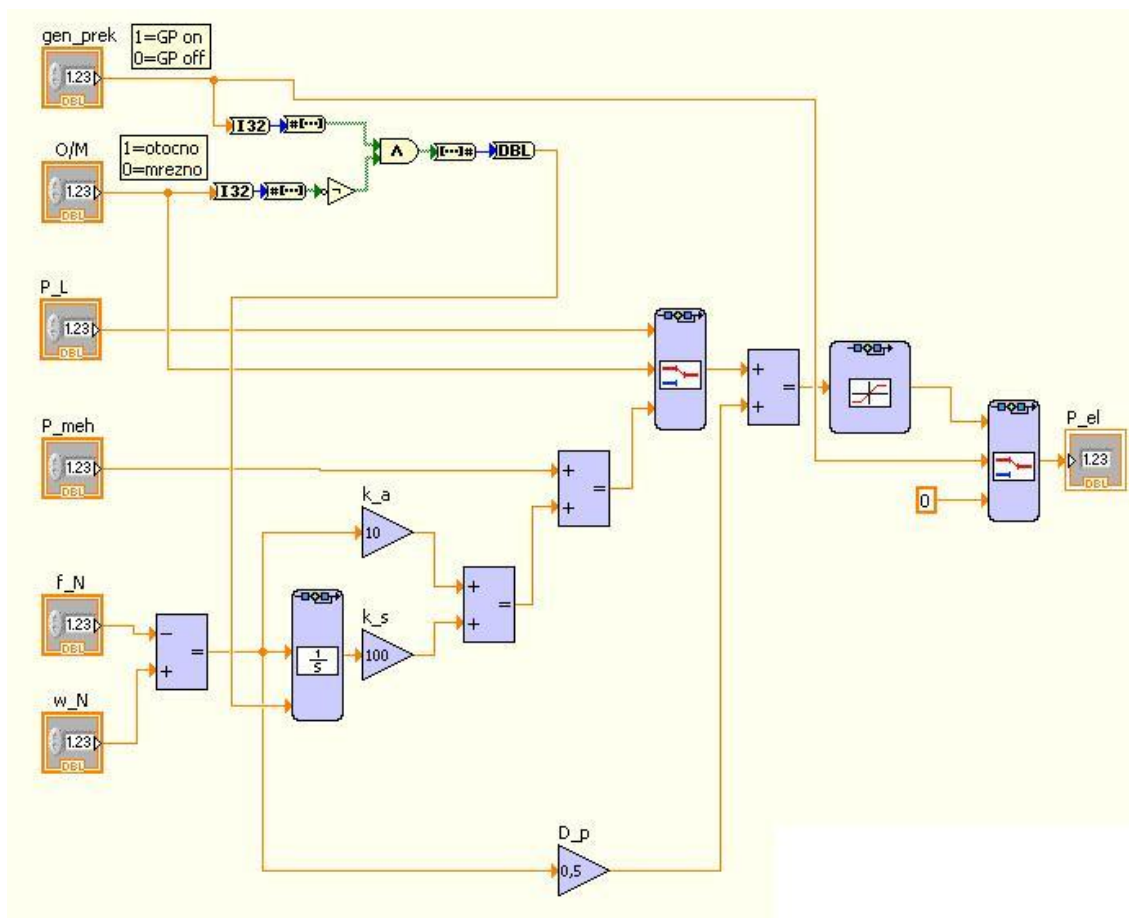
$$P_{el} = P_L + D_p \cdot (\omega_N - f_N), \quad (27)$$

gdje je  $\omega_N$  brzina vrtnje agregata,  $f_N$  frekvencija mreže te  $D_p$  koeficijent prigušenja električne mreže.

Zadnji način računanja električne snage generatora se koristi kada je generator spojen na mrežu te se računa po slijedećoj formuli:

$$P_{el} = (\omega_N - f_N) \cdot k_a + k_s \cdot \left( \int (\omega_N - f_N) dt \right) + P_{meh} + D_p \cdot (\omega_N - f_N), \quad (28)$$

gdje je  $k_a$  koeficijent asinkrone snage,  $k_s$  koeficijent sinkronizirajućeg momenta, te  $D_p$  koeficijent prigušenja ("samoregulacije") mreže. Dok je agregat priključen na mrežu, električna snaga se zasniva na mehaničkoj snazi agregata  $P_{meh}$ , te je brzina vrtnje određena frekvencijom.

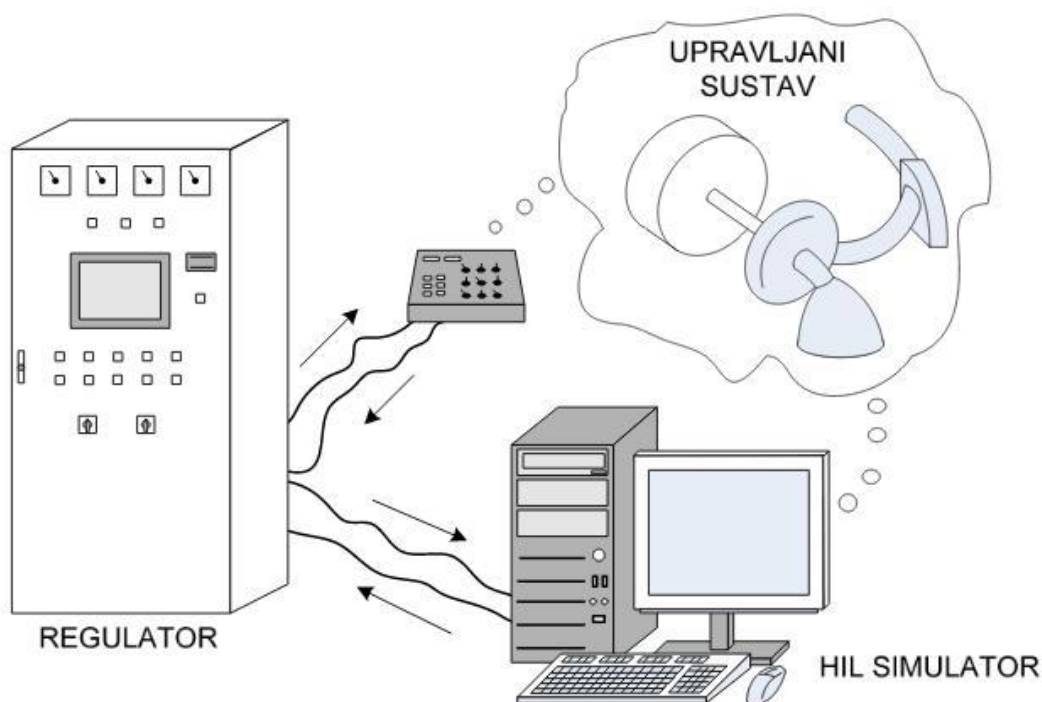


Slika 9. Opterećenje na generatorskom prekidaču

## 6. Hardware in the loop simulacija

*Hardware in the loop (HIL)* je tehnika koja se koristi u razvoju i testiranju *real-time* ugradbenih sustava. HIL simulacija omogućava dizajniranje regulatora bez priključka na stvarni sustav te je projektirani regulator povezan sa simulatorom reguliranog sustava i njegovom okolinom. HIL simulacija uključuje simulator, koji oponaša stvarni sustav sa svojim senzorima i aktuatorima povezanim na projektirani ugradbeni sustav s kojim su povezani putem električnih impulsa. Ugradbeni sustav prima električne impulse te pomoću njih provodi zadane algoritme preko kojih određuje upravljačke impulse.

HIL je , zbog svojih karakteristika, vrlo popularan način razvoja ugradbenih sustava. Glavne prednosti su niska cijena, kraće trajanje razvoja, sigurnost te izvedivost. Ispitivanja nije potrebno provoditi na stvarnom sustavu se te zbog toga ne treba zaustavljati pogon nego se 95% regulatora može odrediti na simulaciji. Pri ispitivanju se također smanjuje rizik od ljudske greške jer se ne opterećuje stvarni sustav,a moguće je uočiti većinu pogrešaka i nedostataka projektiranog regulatora. HIL testiranja su danas sveprisutna te se koriste pri razvoju mnogih sustava poput radara, autmombila, robota i u elektroenergetskim postrojenjima. Nezamjenjiva su u ispitivanju sustava pri nepoželjnim, teško ostvarivim ili opasnim režimima rada. Buduću da se ispitivanja mogu provoditi u isto vrijeme kad se razvija i stvarni sustav nije potrebno čekati završetak stvarnog sustava. Vrijeme razvoja regulatora je znatno kraće nego pri ispitivanju na stvarnom sustavu.

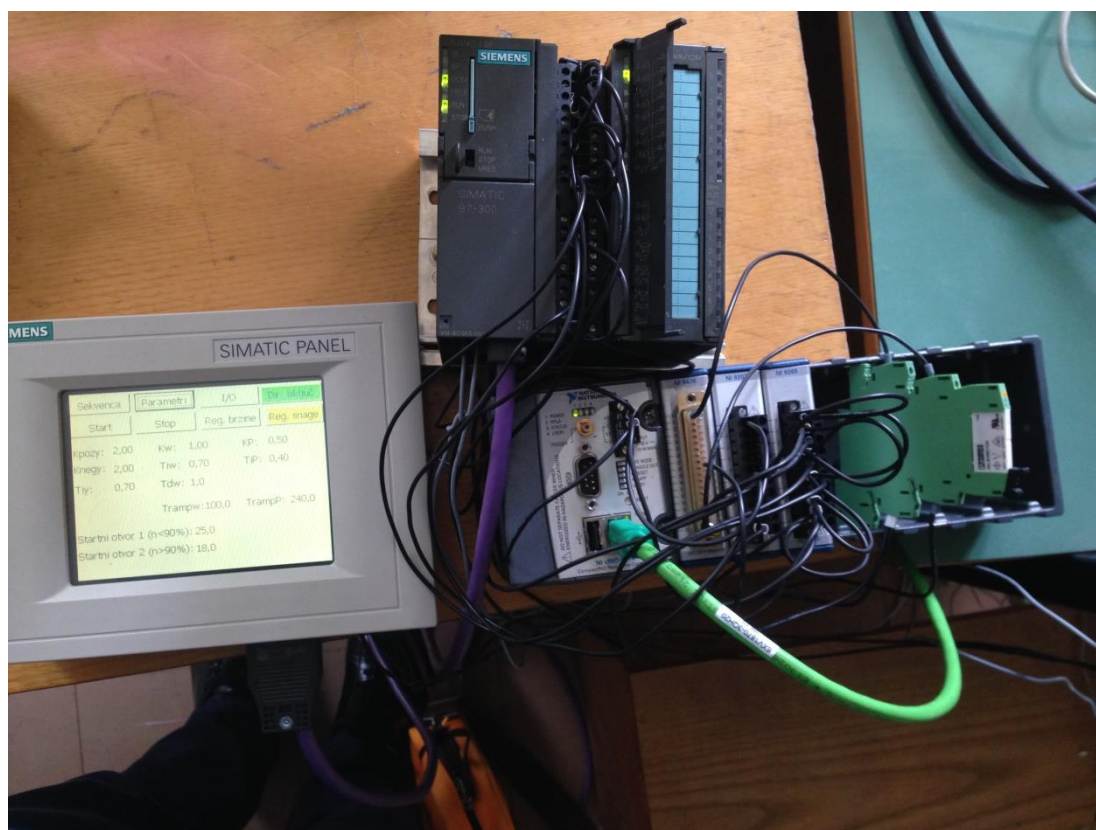


Slika 10. Način provedbe HIL simulacije za slučaj sustava turbinske regulacije <sup>4</sup>

<sup>4</sup> Bakarić V., Mišković I., Horvat K., HIL ispitivanja turbinske regulacije HE Lečće, Cavtat, 2011., slika 1.

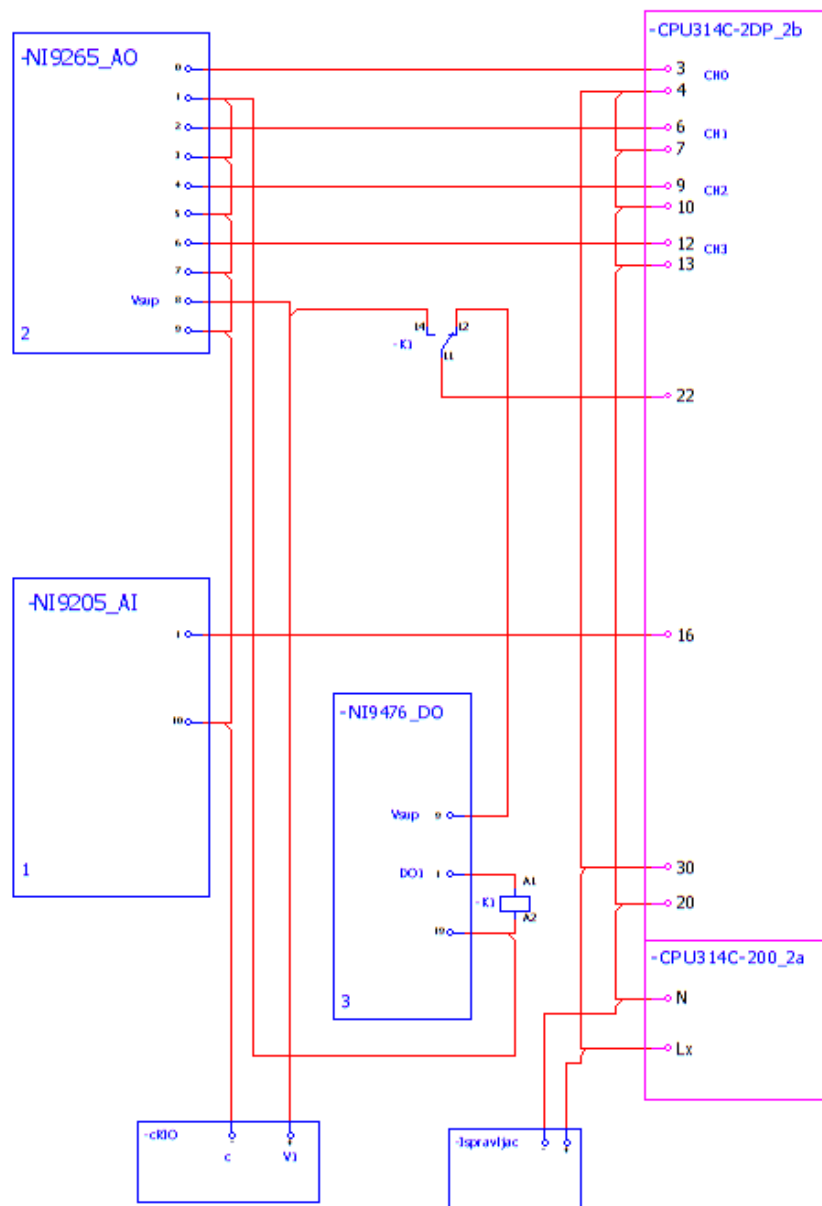


HIL simulator predstavlja turbinu i njezinu okolinu, i povezan je s regulatorom, dok se vanjski signali potrebni za željeni opseg ispitivanja postavljaju preko simulacijskog panela. HIL simulator u ovom diplomskom radu je NI cRIO platforma koja je povezana s regulatorom izvedenim na PLC-u te oni zajedno predstavljaju sustav hidroelektrane.



Slika 11. PLC, panel i cRIO spojeni u HIL način ispitivanja

HIL način ispitivanja može se koristiti od najjednostavnijih sustava, gdje se treba ispitati ponašanje regulatora na određenu pobudu, alarm ili promjenu stanja određenog signala, do najmodernijih automobila, brodova ili nekih složenijih sustava. Danas je pri HIL ispitivanju potrebno koristiti simulacijski model izveden na 'real time' digitalnom procesoru, te je zbog sve veće složenosti sustava i potrebe za što preciznijim modelom potrebna sve veća složenost HIL simulatora. Kakav god HIL simulator radili to je puno jeftinija i sigurnija metoda od ispitivanja na prototipu upravljanog sustava.



Slika 12. Električna shema PLC-a, panela i cRIO-a spojenih za HIL testiranje

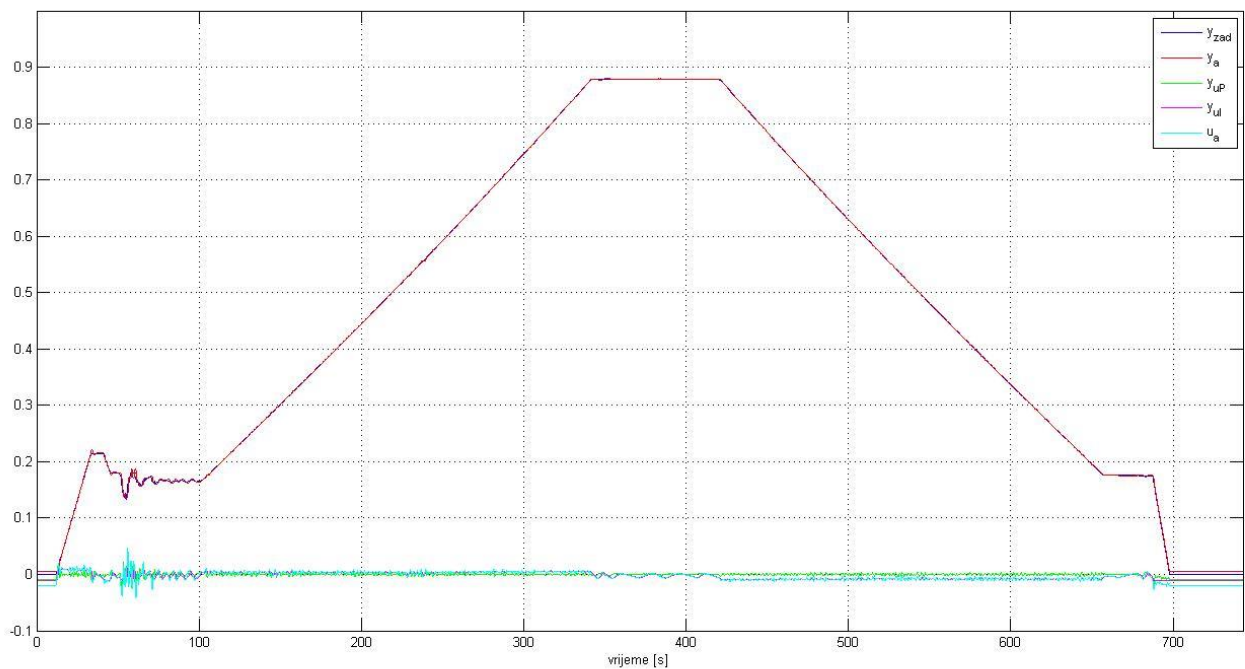
## 7. Regulator

Regulator Hidroelektrane Golubić napravljen je na Siemensovom PLC-u u programskom okruženju Simatic Manager. Kako bi se to napravilo, uzeo se

već napravljeni regulator Hidroelektrane Lešće te se uz neke manje izmjene dobio dobar regulator. Sustav turbinske regulacije se sastoji od tri regulatora, PID regulatora brzine vrtnje, PI regulatora snage i PID regulatora otvora privodnog kola.

### 7.1. Regulator otvora privodnog kola

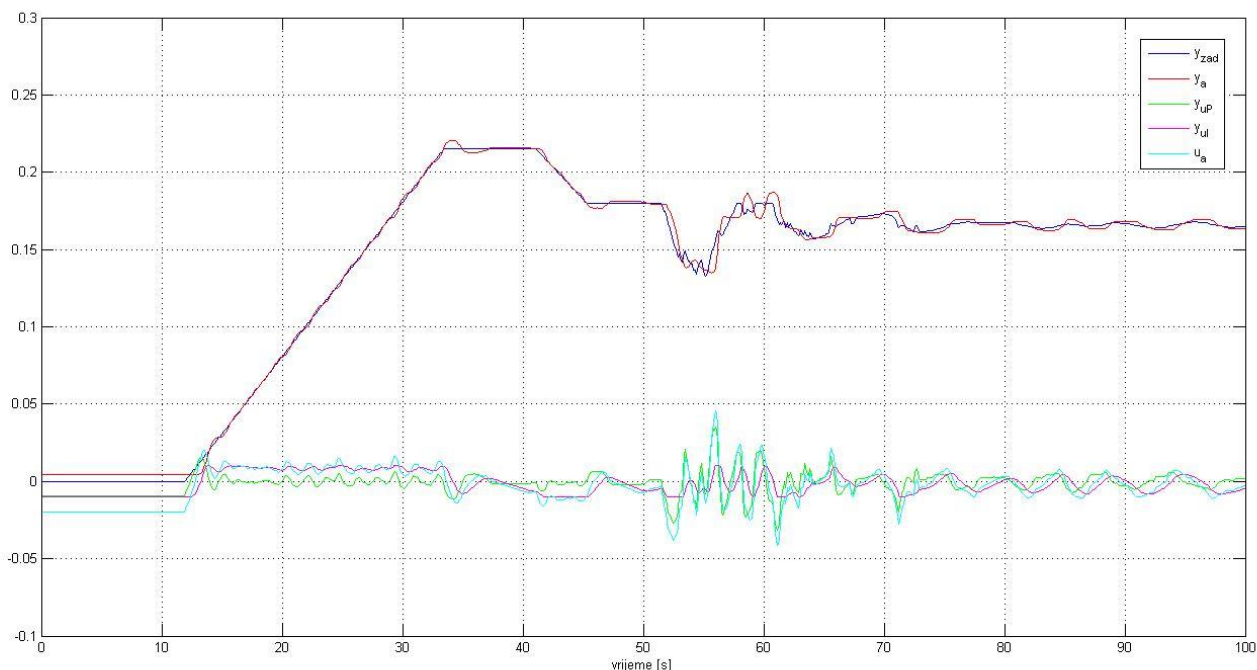
Regulator privodnog kola je PID regulator koji se koristi u svim režimima rada. Promjenom otvora privodnog kola mijenjaju se ostale veličine, te se zapravo promjenom otvora privodnog kola mijenjaju snaga i brzina vrtnje regulatora.



Slika 13. PI regulator otvora privodnog toka

Parametri regulatora dobiveni su testiranjem. Potrebno je zadovoljiti uvjet da se ne kasni previše za zadanim otvorom i da ne postoje velika nadvišenja. Pozitivno i negativno proporcionalno pojačanje regulatora iznosi  $K_{pozy} = K_{negy} = 2$  dok vremenska konstanta integralnog dijela regulatora iznosi  $t_{iy} = 0,7$ .

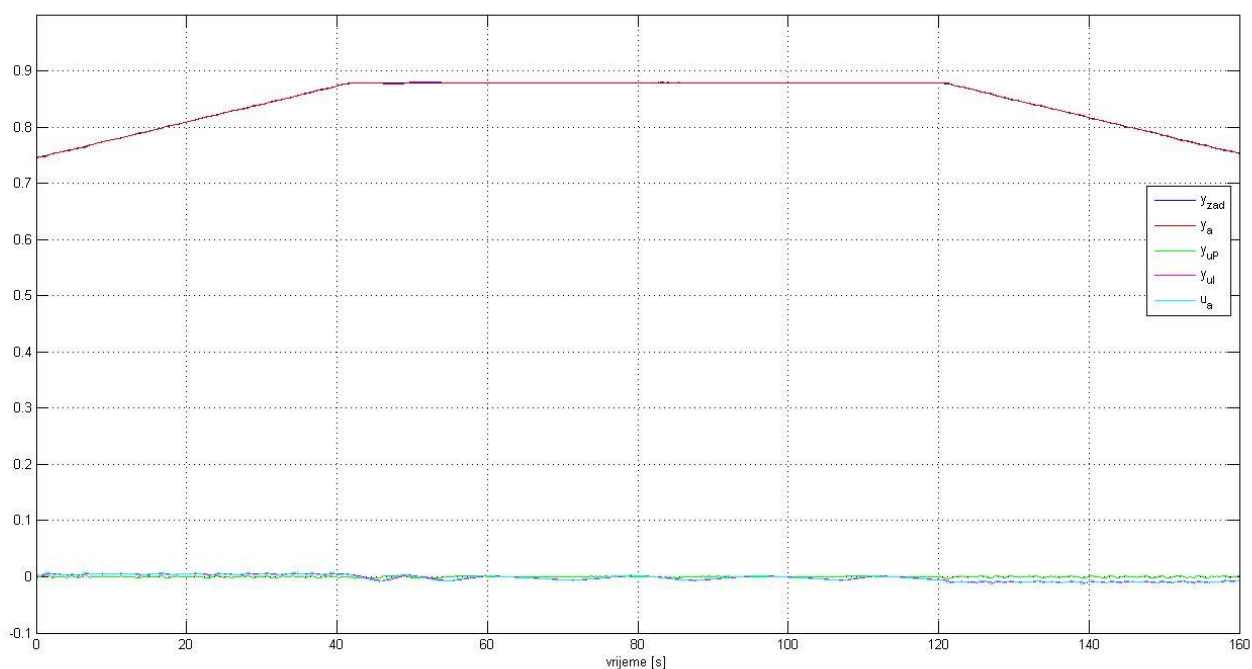
Na slici 13. vidi se ponašanje zadane i mjerene vrijednosti otvora privodnog toka, proporcionalna i integralna komponenta regulatora te upravljački signal  $u_a$ . Mjerena vrijednost otvora privodnog toka dobro prati referentnu vrijednost što se također vidi na slici. Upravljačkim signalom se mijenja otvor privodnog kola, tj. Njime se otvor otvara i zatvara. Pozitivnim signalom povećavamo otvor, dok se negativnim zatvara. U prvih 100 sekundi testa brzina vrtnje se podešava na nazivnu te kad je ona podešena uključuje se generatorski prekidač i hidroelektrana se poveže na mrežu i počne stvarati električnu energiju.



Slika 14. Područje najveće pogreške regulatora otvora

Na slikama 14. i 15. prikazani su dijelovi najveće i najmanje točnosti regulatora. Najveća razlika u zadanom i mjerenom otvoru privodnog kola događa se pri podešavanju brzine vrtnje na nazivnu, a odstupanje iznosi 1,93% maksimalnog otvora privodnog kola. U svim ostalim slučajevima regulator radi vrlo dobro te je odstupanje oko 0,1%.

U cijelom području rada regulatora proporcionalna komponenta je proporcionalna upravljačkom signalu, tj. pomnožena je veličinom manjom od 1, dok integralna komponenta vjerno prati upravljački signal što se najbolje vidi na dijelu najveće točnosti regulatora kada su potpuno istog iznosa. Pri promjeni željene snage mijenja se i otvor privodnog kola. To se vidi na dijelovima gdje otvor privodnog kola raste od 0,18 do 0,8796. Tada mjereni otvor prati zadani otvor te maksimalna razlika između njih iznosi 0.4% maksimalnog iznosa otvora privodnog kola.



Slika 15. Područje najveće točnosti regulatora

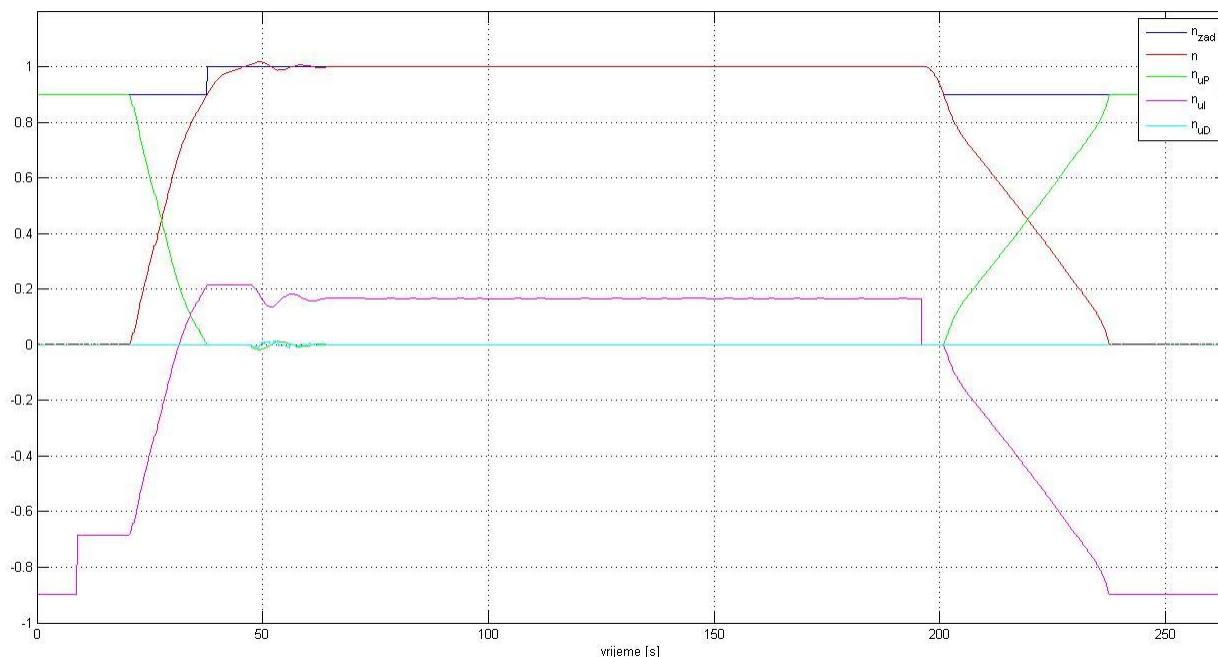
Budući da se otvorom privodnog kola regulira brzina vrtnje turbine ili električna snaga hidroelektrane, ovisno o režimu rada hidroelektrane, referentna vrijednost otvora privodnog kola raste poput rampe dok se ne postigne zadana brzina vrtnje ili snaga. Time se postiže maksimalna preciznost ukupnog regulatora. Također, ako bi se premašila zadana vrijednost brzine vrtnje ili snage, regulator otvora privodnog kola bi automatski smanjio referentnu vrijednost otvora privodnog kola te bi radio

sve manje i manje korake oko točne vrijednosti dok se mjerena veličina ne bi u potpunosti poklapala sa zadanom.

## 7.2. Regulator brzine

Regulator brzine je PID regulator. Koristi se u početnom dijelu rada turbine kada je potrebno podesiti brzinu vrtnje na nazivnu ili u slučaju kada je hidroelektrana u otočnom režimu rada. Bez obzira koristi li se regulator ili ne on je uvijek u pogonu kako bi mogao brzo i kvalitetno preuzeti ulogu u slučaju promjene režima rada. Kao i u predhodnom regulatoru komponente su podešene ručno te pojačanje proporcionalne komponente iznosi  $K_{\omega} = 3$ , vremenska konstanta integralne komponente iznosi  $T_{i\omega}=1$ , dok je vremenska konstanta derivativne komponente  $T_{d\omega} = 0,1$ . Glavni uvjet pri projektiranju regulatora brzine je malo nadvišenje. Brzina odziva je manje bitna zbog činjenice da turbina ima veliku inerciju te ju je teško pokrenuti i zaustavit. Također je važno da su oscilacije pri nazivnoj brzini što manje jer to utječe na frekvenciju mreže. Također pri priključivanju hidroelektrane na mrežu brzina vrtnje turbine mora iznositi točno koliko i nazivna brzina. U tom se trenutku zbog pretpostavke beskonačne mreže frekvencija postavlja na nazivnu te se regulator prebacuje na regulaciju snage.

Čim se sustav pokrene zadana brzina iznosi 90% nazivne te se uključuju proporcionalna i integralna komponenta regulatora. Odziv prvo miruje neko vrijeme zbog inertnosti turbine i potrebnog protoka koji bi pokrenuo turbinu. Čim se brzina vrtnje popne na 90% zadaje se nova referentna brzina od 100%, tj. nazivna brzina vrtnje. Derivativna komponenta regulatora uključuje se kada brzina vrtnje naraste iznad nazivne te sprječava daljnje oscilacije brzine vrtnje.



Slika 16. PID regulator brzine vrtnje turbine

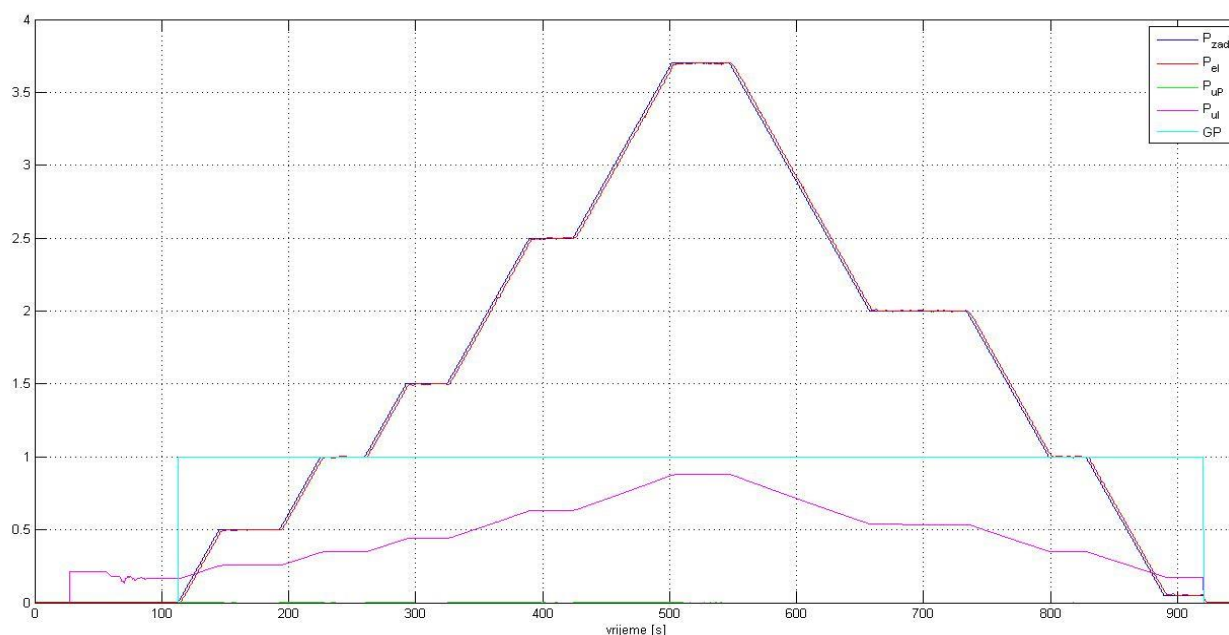
Regulator brzine vrtnje nije precizan kao i regulator otvora privodnog kola iz tri razloga. Prvi je da se postavljaju skokovite pobude većeg iznosa nego kod regulatora privodnog kola gdje zadani otvor raste vrlo sporo, drugi razlog je inercija turbine zbog koje je brzina odziva prilično velika i zadnji razlog je taj što je brzina vrtnje turbine reakcija na otvor privodnog kola.

### 7.3. Regulator snage

Regulator snage je PI oblika. Kao i regulator brzine vrtnje radi u seriji s regulatorom otvora privodnog kola. Koristi se nakon spajanja hidroelektrane na mrežu, ali je uključen cijelo vrijeme, što se najbolje vidi na slici 17. kada je proporcionalna komponenta integratora različita od nule iako je generatorski prekidač isključen. Konstantni rad regulatora omogućuje glađe i bolje prebacivanje s regulacije brzine vrtnje turbine na regulaciju snage. Za razliku od ostalih vrijednosti, koje su izražene u postocima od najveće ili nazivne veličine, snagu izražavamo u megavatima [MW]. Kao i kod prošlih regulatora i ovdje su komponente namještene ručno, a morao se zadovoljiti uvjet da



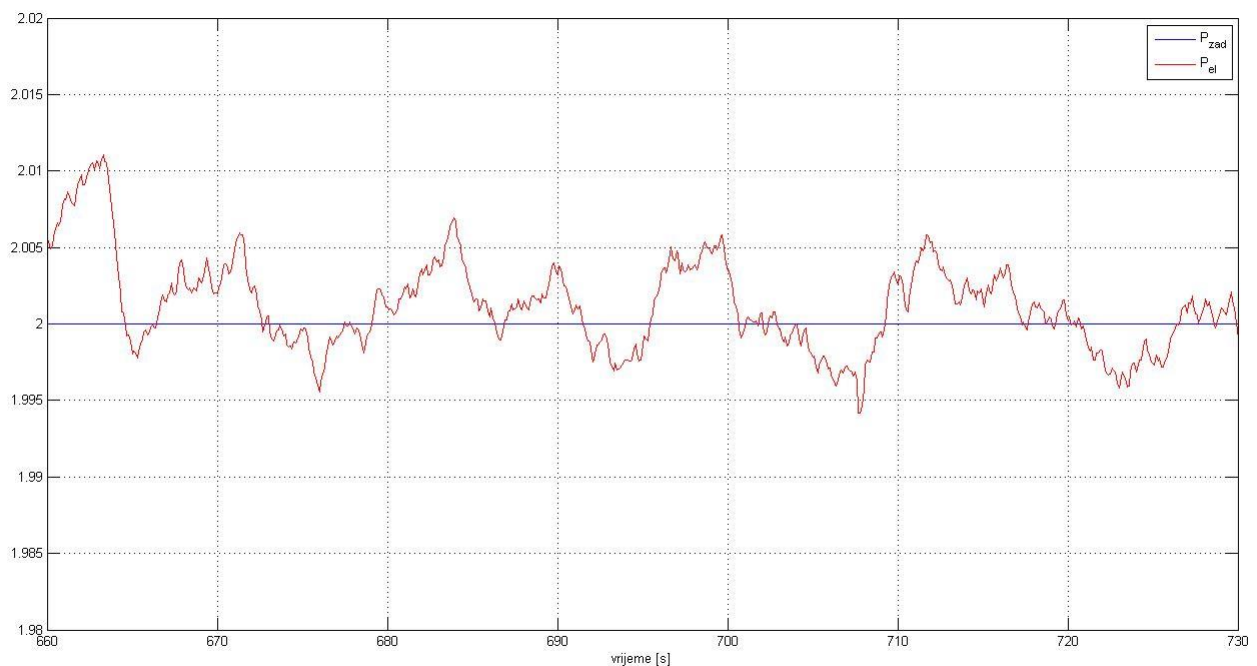
nema velikih oscilacija te da one što kraće traju, dok je brzina odziva manje bitna. U elektroenergetskom sustavu oscilacije su vrlo nepoželjne te mogu izazvati pad frekvencije. Također je potrebno da u svakom trenutku svaki korisnik može koristiti električnu energiju te je potrebno moći u svakom trenutku podesiti točno željenu snagu elektrana. Pojačanje proporcionalne komponente iznosi  $K_p = 0,5$ , dok je vremenska konstanta integralne komponente regulatora  $T_{ip} = 0,4$ .



Slika 17. PI regulator snage

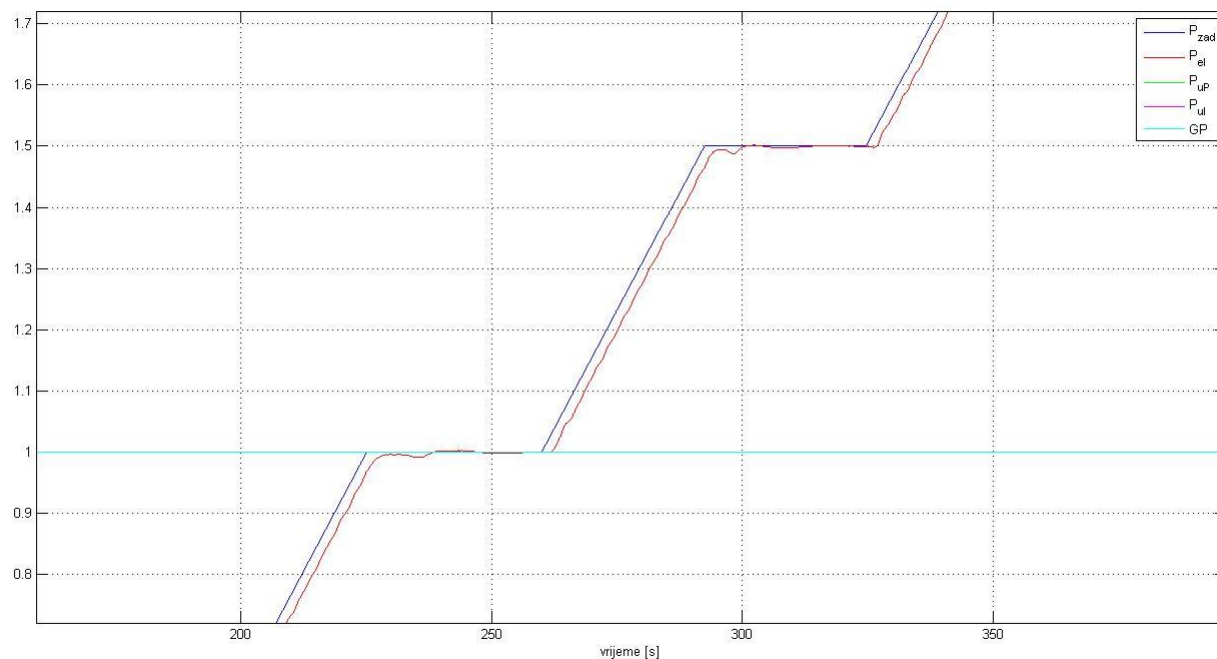
Na slici 17. vide se iznos zadane snage  $P_{zad}$ , iznos stvarne snage  $P_{el}$ , proporcionalna komponenta regulatora snage  $P_{up}$ , integralna komponenta regulatora snage  $P_{ul}$ , te generatorski prekidač  $GP$ . Stvarni iznos električne snage prati zadani s malim zakašnjenjem od 2.3 sekunde. U realnom električnom sustavu to je zanemarivo zakašnjenje. Također, na slici 18. se vidi da oscilacija gotovo da i nema, tj. iznose maksimalno oko 0,01 MW što potvrđuje da regulator dobro izgladuje oscilacije.





Slika 18. Oscilacije snage uz ustaljenu zadanu snagu

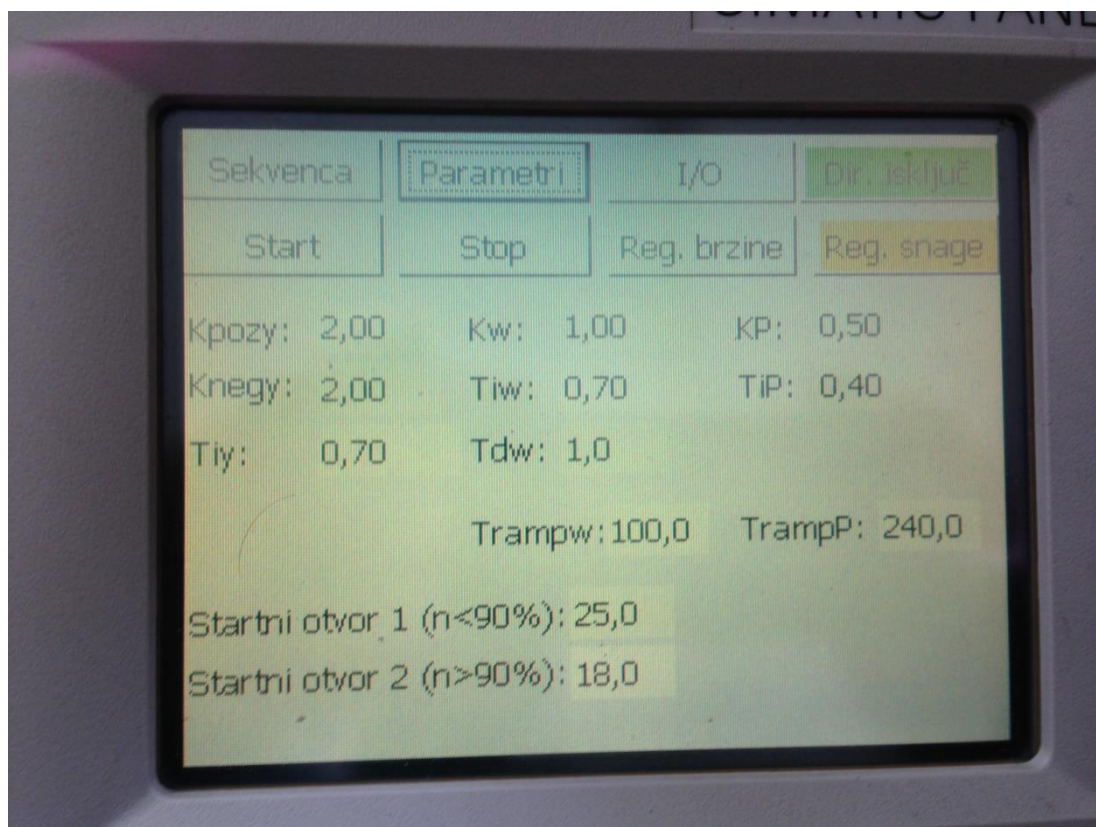
Vrlo veliku ulogu u otklanjanju oscilacija i kašnjenja ima način zadavanja referentne snage. Iako je stvarna zadana snaga podignuta s 1 na 1,5 MW, regulator zadaje male skokove dok se ne dođe do vrijednosti od 1,5 MW, što se najbolje vidi na slici 19. Na taj se način izbjegavaju veće skokovite promjene referentne snage te ona raste po rampi.



Slika 19. Porast zadanog iznosa snage

## 8. Upravljanje regulatorom

Regulatorom se može upravljati preko upravljačkog panela, kojeg vidimo na slici 20. To je 5.7 inčni monitor, rezolucije 320x240 piksela. Može prikazati 256 različitih boja, a sa PLC regulatorom je povezan Profibuss sabirnicom. Pritiskom na tipku Start pokreće se testiranje, koje se zaustavlja tipkom stop. Također je moguće podesiti startne otvore1 i 2 koji su zadani otvori do kojih se dovodi otvor privodnog toka nakon početka testiranja. Na touch panelu se zadaju odabrana pojačanja i vremenske konstante proporcionalne, integralne i derivativne komponente regulatora.



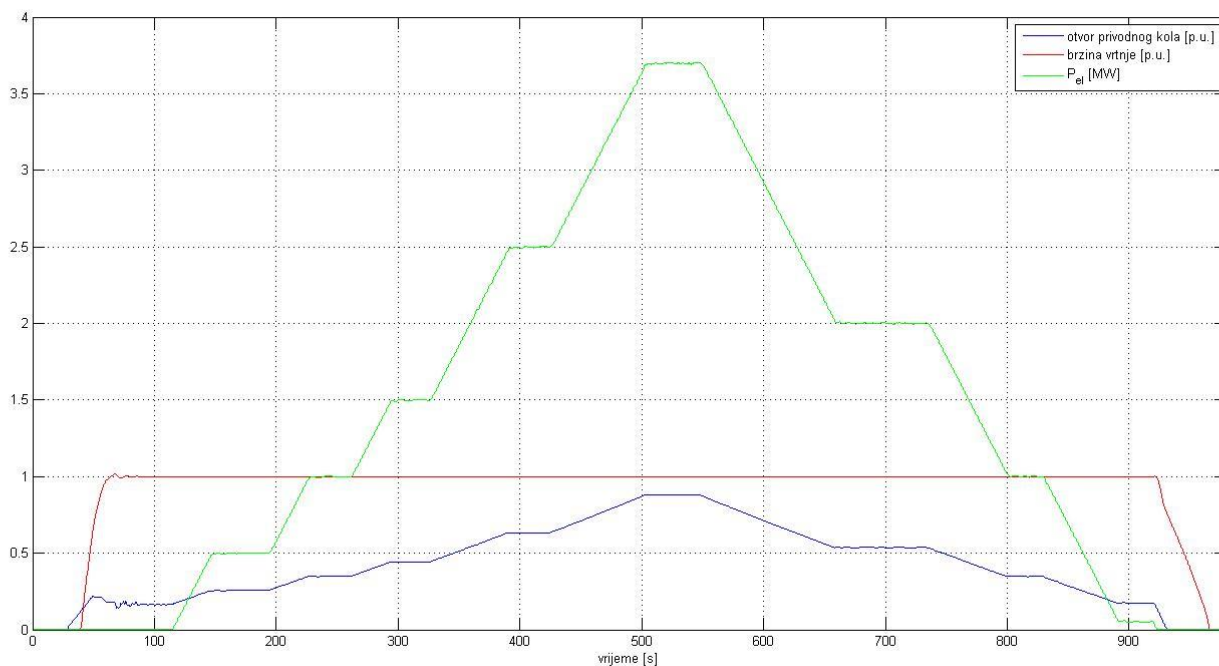
Slika 20. Touch panel za upravljanje regulatorom

## 9. Testiranje

Provedena su četiri različita testiranja turbinskog regulatora. U prvom dijelu zadaju se određene referentne snage. U drugom testu se zadaje maksimalna snaga te se poslije ona spušta na minimalnu. Nakon toga, u trećem testu, se zadaje ponovno maksimalna snaga, ali se zaustavljanje privodi pritiskom tipke stop, te se u zadnjem testu testira brzina tako da se zadaje na nazivnu i potom spušta na nulu. Svako testiranje pokazalo je dobre rezultate, o čemu će biti priča u slijedećim odjeljcima.

### 9.1. Test 1.

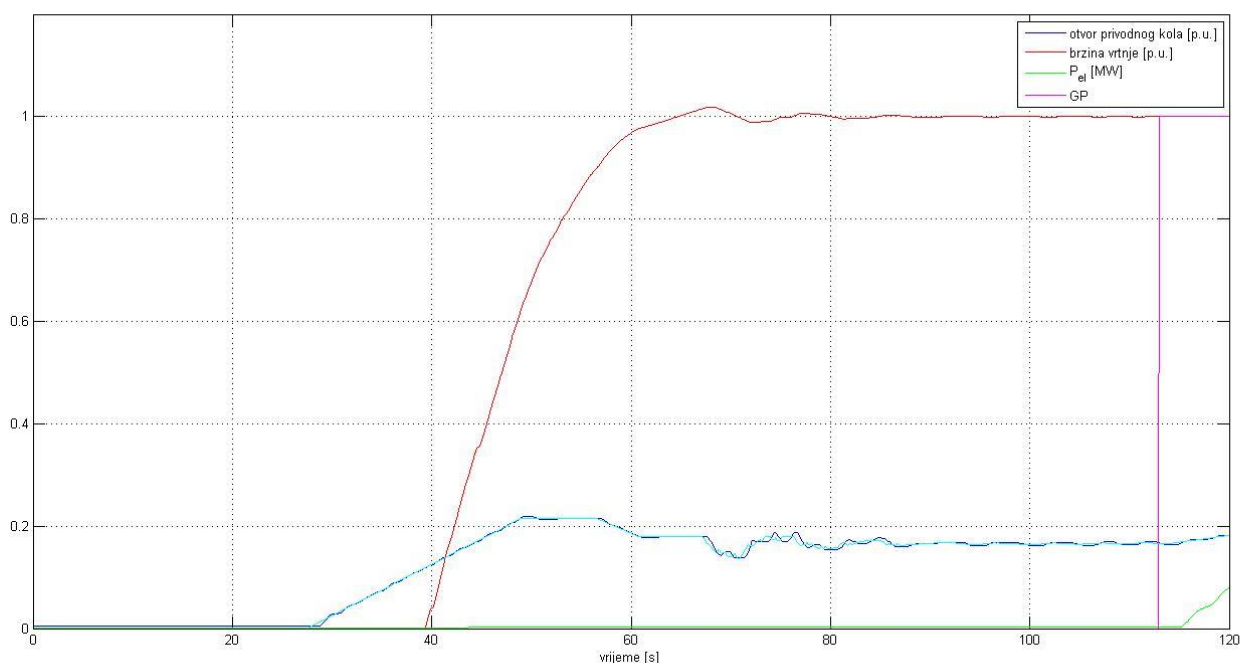
U prvom testu se provjerava kako regulator prati zadane vrijednosti referentne snage. To se provjerava zadavanjem različitih snaga. Također se provjerava iznos snage u odnosu na otvor privodnog toka.



Slika 21. Otvor privodnog kola, brzina vrtnje regulatora te električna snaga kod testa 1.

Sustav se pokreće pritiskom na tipku starta kada se, kao referentni otvor zadaje 25% maksimalnog otvora privodnog toka. Taj je iznos zadan na „touch panelu“ kao Startni otvor 1. Time se postiže zalet turbine, pri pokretanju, čiju brzinu vrtnje želimo dovesti na iznos nazivne brzine. U startnom dijelu rada hidroelektrane regulira se iznos brzine vrtnje turbine. Kada otvor dosegne Startni otvor 1 referentni otvor se zadaje na vrijednost upisanu u Startni otvor 2, a iznosi 18% maksimalnog otvora privodnog toka. Također Startni otvor 2 je iznos maksimalnog otvora privodnog kola za iznos brzine vrtnje turbine jednak nazivnom, a da hidroelektrana nije priključena na mrežu. Maksimalni otvor privodnog kola je potrebno postaviti kako turbina ne bi ubrzala do nekog kritičnog iznosa pri kojem postoji velika mogućnost

oštećenja turbine ili nekih drugih dijelova hidroelektrane. U trenutku kada iznos brzine vrtnje postane veći od iznosa nazivne brzine regulator malo zatvori otvor privodnog toka, a trenutni iznos spremi kao maksimalni. Potom kada brzina vrtnje padne ispod nazivne regulator poveća otvor privodnog kola tako da on sada iznosi malo manje od maksimalnog, a trenutni iznos spremi u minimalni. Regulator tako podešava brzinu vrtnje dok razlika između maksimalnog i minimalnog iznosa otvora privodnog toka nije dovoljno mala, a brzina vrtnje jednaka nazivnoj. Cijeli ovaj proces podešavanja brzine vrtnje turbine na nazivnu najbolje se vidi na slici 22.



Slika 22. Podešavanje brzine vrtnje turbine na iznos nazivne brzine

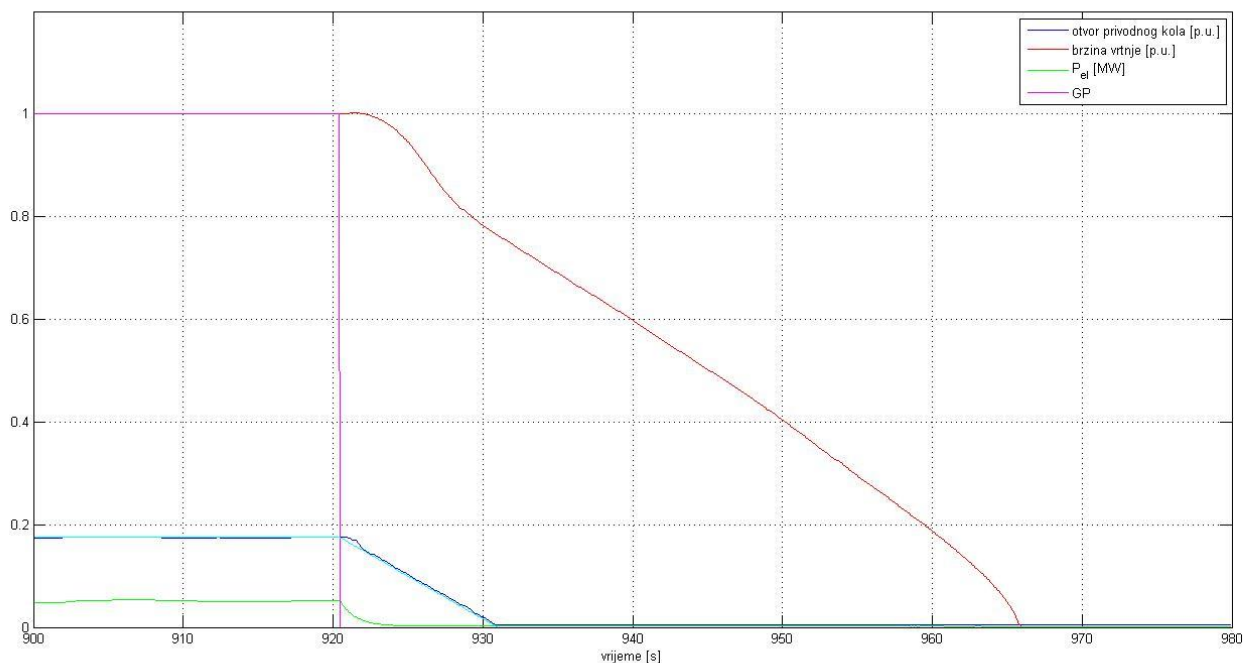
Generatorski prekidač se uključuje kada je brzina vrtnje turbine jednaka nazivnoj. Uključivanjem generatorskog prekidača hidroelektrana se spaja na mrežu te brzina vrtnje postaje nazivna zbog hipoteze beskonačne mreže. Tada brzinu vrtnje određuje frekvencija mreže te je utjecaj agregata na frekvenciju mreže zanemariv. Pri uključivanju generatorskog prekidača posebno je važno paziti da je iznos brzine vrtnje jednak nazivnom jer su inače mogući skokovi frekvencije i brzine vrtnje što može dovesti do

nestabilnosti sustava, a posljedično do oštećenja. Uključivanjem generatorskog prekidača sustav prelazi na regulaciju snage, te se kao minimalna početna snaga zadaje 0,05 MW. Izostavljanje neke minimalne početne snage također može dovesti do nestabilnosti jer ako je sustav bez opterećenja, a mreža omogućava brzinu vrtnje turbine jednaku nazivnoj, moguća je pojava velikih oscilacija brzine vrtnje i oštećenja turbine.

Prelaskom u mrežni režim rada hidroelektrane moguće je zadavati razne vrijednosti snage koju bi hidroelektrana trebala proizvesti. U testu 1 zadane su snage od 0.5, 1, 1.5, 2.5, 3.7, 2, 1 i 0.05 MW. Za svaku od zadanih snaga, regulator je doveo sustav u zadanu točku, bez postizanja oscilacija i bez opasnosti od ulaska u nestabilni odziv. Također je moguće pratiti iznos otvora privodnog kola za pojedini iznos snage, a on ovisi o protoku kroz otvor. U stvarnosti protok nije konstantan nego ovisi o otvoru i visini vode iznad turbine koji može biti promjenjiv. Kod velikih akumulacijskih jezera visina vode se ne mijenja previše zbog protoka vode kroz turbinu, ali su moguće veće promjene ovisno o godišnjem dobu i sezoni padalina. U našem slučaju visina vode je konstanta zbog visokotlačne cijevi kojom se voda dovodi do turbine iako je akumulacijsko jezero relativno malo. Za potrebe testiranja visina vode postavljena je na 64 metara. Kod maksimalne snage otvor privodnog kola iznosi 88% maksimalnog otvora. Dodatnim povećanjem otvora može doći do nestabilnosti sustava i oštećenja na turbini.

Kako bi zaustavili turbinu referentna snaga se postavi na 0.05 MW te se može isključiti generatorski prekidač i odspojiti hidroelektranu s mreže. Sve referentne vrijednosti tada se postave na nulu i polako dođu do nule. Brzini vrtnje je potrebno najviše vremena kako bi se spustila u nulu zbog svoje velike inercije te zbog malog otpora koji nastaje na ležajevima.

U provedenom testu je dokazano da regulator dobro podešava zadane vrijednosti snage te da u navedenim okolnostima sustav ne može dovesti u nestabilno stanje.

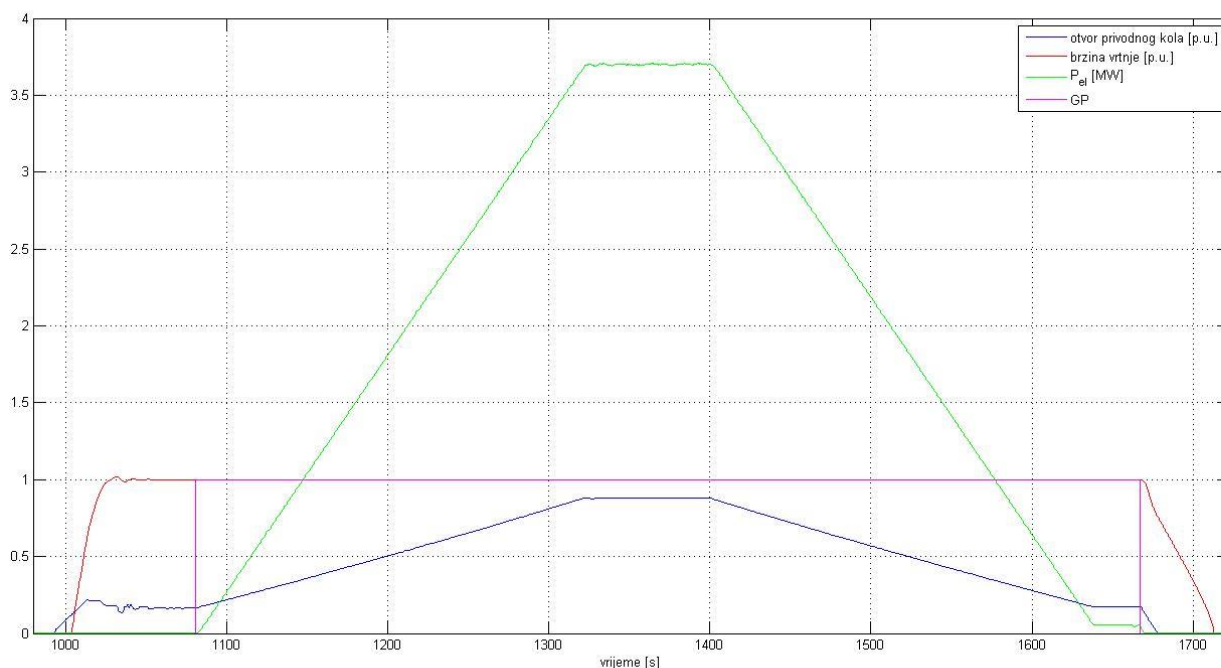


Slika 23. Zaustavljanje rada hidroelektrane

## 9.2. Test 2.

U drugom testu ispituje se ponašanje sustava pri maksimalnom opterećenju i pri maksimalnoj promjeni opterećenja. Kao i u prvom testiranju potrebno je prvo izjednačiti brzinu vrtnje turbine s nazivnom te potom priključiti hidroelektranu na mrežu pomoću generatorskog prekidača. Kada se hidroelektrana spoji na mrežu, preko „touch panela“ se, kao referentna snaga, zada maksimalna električna snaga turbine koja iznosi 3,7 MW. Nakon što se brzina vrtnje ustabilila na 3,7 MW, zadana snaga turbine se postavi na 0,05 MW te se prati ponašanje sustava.

Ovaj test koristi se da bi se saznalo ponašanje sustava pri velikim promjenama referentne snage. Iz odziva, na slici 24. vidi se da nema velikih oscilacija pri velikim promjenama referentne snage. Za takvo ponašanje sustava najzaslužniji je postepeni rast referentne snage koji pomoću mnogo manjih koraka podiže snagu do zadane.



Slika 24. Odzivi otvora privodnog kola, brzine vrtnje, električne snaga turbine i vrijeme priključka hidroelektrane na električnu mrežu u slučaju testa 2

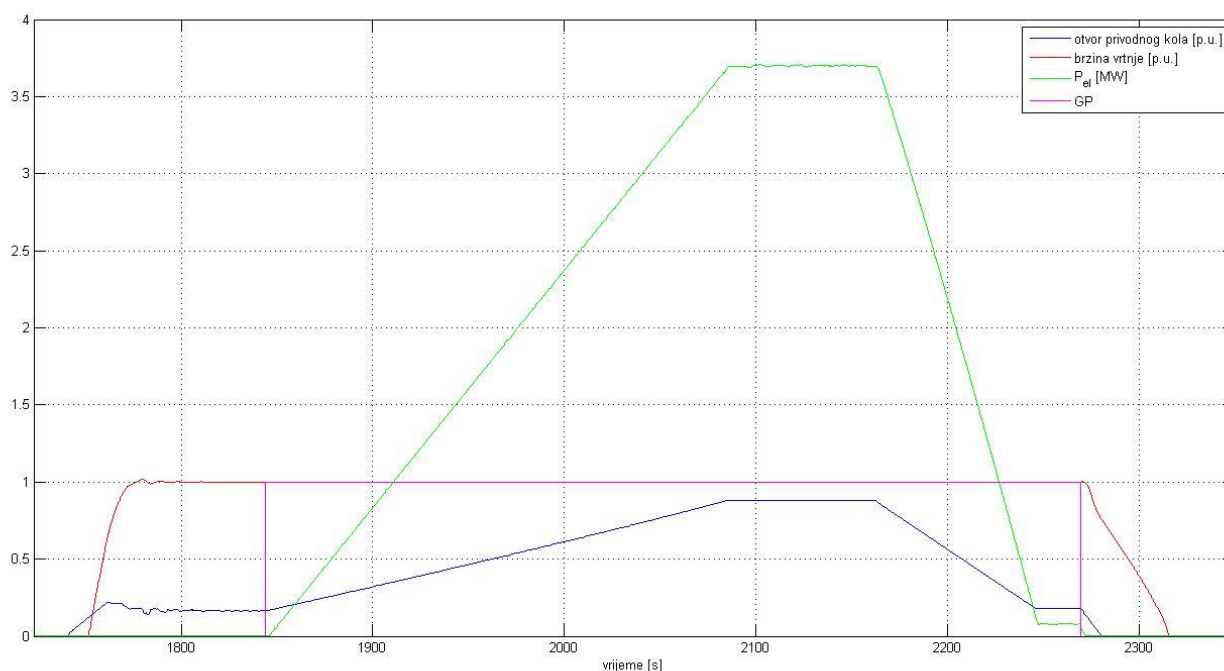
### 9.3. Test 3.

U trećem testu provjerava se utjecaj regulatora tlaka na zaustavljanje turbine. Isto kao i u prošlom pokusu snaga turbine se dovede na maksimalnu, ali pri zaustavljanju se pritisne tipka Stop, dok snaga iznosi 3,7 MW, umjesto postavljanja referentne snage na minimalnu pa naknadnog pritiska na tipku Stop.

Zbog velike razlike visine između turbine i površine vode, potrebno je ograničiti porast tlaka koji nastaje vodnim udarom. Vodni udar se pojavljuje pri zatvaranju otvora privodnog kola. Na nizvodnom kraju cjevovoda se dogodi udar zbog nagle promjene brzine vode te njezine velike mase i inercije. Vodni udar je nagla promjena tlaka pri promjeni brzine vode na jednom kraju cjevovoda, a najčešće se događa na nizvodnom kraju cjevovoda uslijed zatvaranja otvora privodnog kola. Brzine širenja promjene tlaka su vrlo velike te u čeličnim cjevovodima mogu iznositi oko 1000 m/s te



su vrlo kratki, do nekoliko desetinki sekunde. Vodni udari se, kod visokotlačnih hidroelektrana ne prenesu u dovodni tunel, jer se kod zatvaranja višak vode iz tunela odvodi u vodnu komoru, ali se pojavljuju oscilacije u cjevovodu koje mogu potrajati nekoliko sati. Kako bi se smanjile posljedice vodnog udara, u Francisovoj turbini, koristi se regulator tlaka. Regulacijom trajanja zatvaranja otvora privodnog kola može se smanjiti porast tlaka na iznos 10 do 15 % od statičkog tlaka.



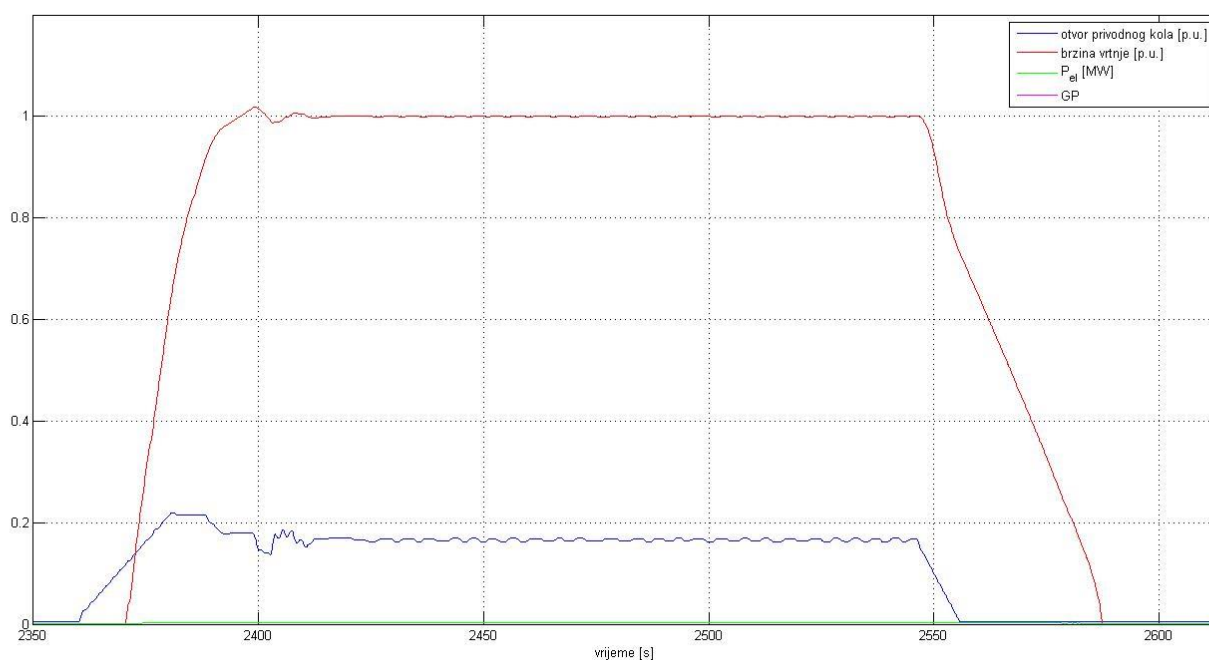
Slika 25. Odstupanje zaustavljanja rada hidroelektrane uz uključen regulator tlaka

Ako se pri zaustavljanju rada hidroelektrane pritisne tipka „Stop“, referentni iznos električne snage se postavlja na 0,05 MW te se uključuje regulator tlaka. Usporedimo li slike 24. i 25. vidi se puno brže smanjivanje snage uz uključen regulator tlaka. Za razliku od prethodnog primjera, u kojem je bilo potrebno 239 sekundi da se snaga postavi na 0,05 MW, u slučaju korištenja regulatora tlaka potrebno je 84,5 sekundi za zaustavljanje. Test je potvrdio tezu da je moguće brže zatvaranje otvora privodnog toka pri korištenju regulatora tlaka, ali nije dokazao da regulator tlaka stvarno djeluje

na smanjenje vodnog udara, zbog nemogućnosti provedbe pokusa snage vodnog udara.

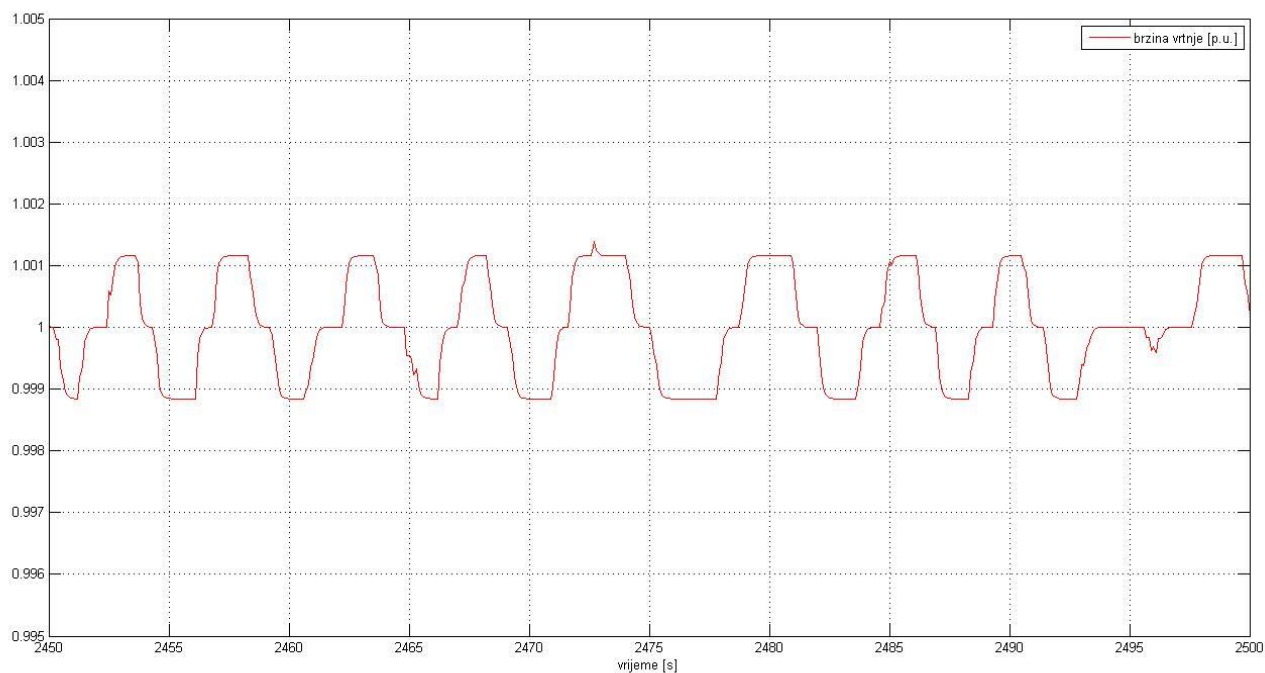
#### 9.4. Test 4.

U zadnjem je testu provjereno ponašanje regulatora brzine vrtnje turbine. Nakon pokretanja rada hidroelektrane brzina vrtnje je dovedena na nazivnu te hidroelektrana nije priključena na električnu mrežu nego je ostavljena da se turbina vrti na nazivnoj brzini bez opterećenja.



Slika 26. Ponašanje brzine vrtnje u ustaljenom stanju

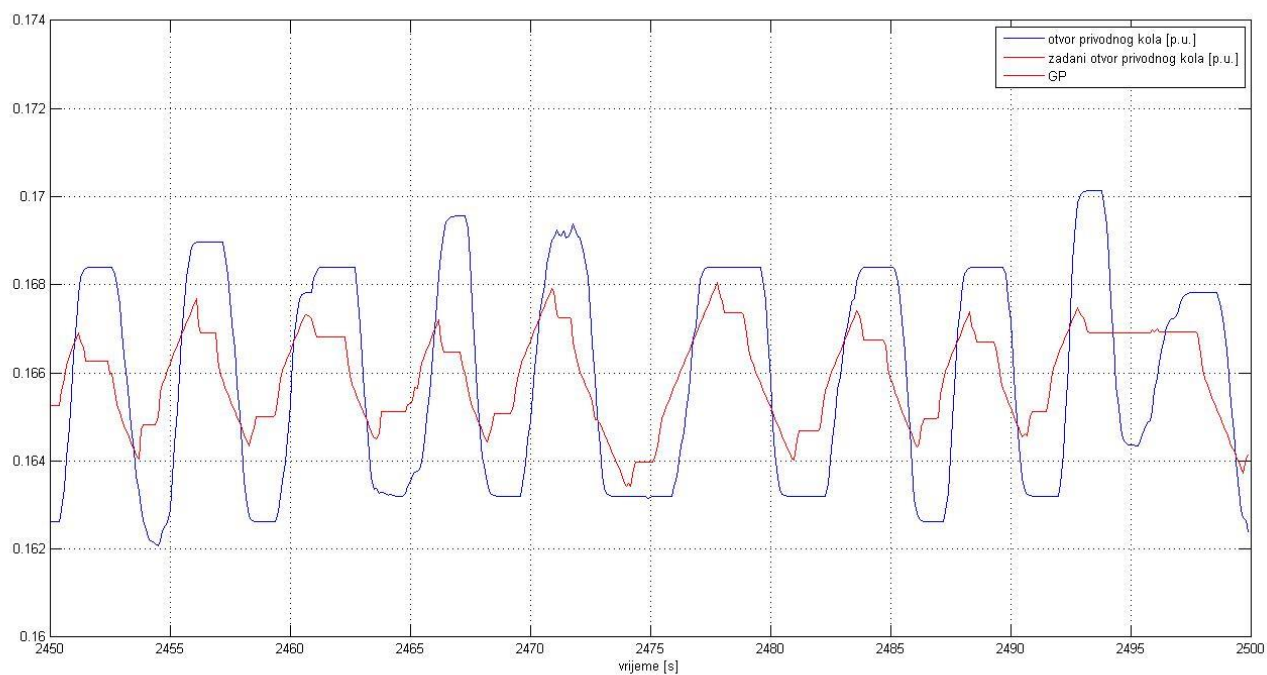
Na slici 26. Je vidljivo da generatorski prekidač nije uključen te da je električna snaga turbine tijekom cijelog testiranja jednaka nuli. Također, postoje male oscilacije otvora privodnog kola te još manje oscilacije brzine vrtnje turbine. One su posljedica načina na koji regulator određuje maksimalni i minimalni otvor privodnog kola za pojedinu brzinu vrtnje, a koji je objašnjen u poglavlju 9.1., te inercije turbine kojoj treba dugo da ubrza i dugo da se uspori. Unatoč svemu maksimalna amplituda oscilacija iznosi 0.12% iznosa nazivne brzine.



Slika 27. Oscilacije brzine vrtnje u ustaljenom stanju

Na slici 27. može se uočiti određeni uzorak ponavljanja oscilacija. Te oscilacije potvrđuju gore izrečenu tvrdnju o njihovim uzrocima. Usporedimo li slike 27. i 28. može se zaključiti da se otvor privodnog kola promjeni kada je sustav u stanju da je teško izbjeći pretjeranu promjenu brzine vrtnje. Još jedan vrlo važan razlog pojavljivanja oscilacija je razlika između mjerenog i zadanog otvora privodnog kola jer je aktuator nesavršeni element te je teško točno namjestiti otvora privodnog kola na zadani iznos.

Kao i prijašnji, i ovaj je test dao željene rezultate te pokazao da se brzina vrtnje turbine, uz pojavu manjih oscilacija, može dovesti vrlo blizu nazivne brzine.



Slika 28. Oscilacije otvora privodnog kola u ustaljenom stanju brzine vrtnje

## **Zaključak**

Za potrebe ovog diplomskog rada koristila se hidroelektrana Golubić koja se nalazi na rijeci Butišnici te je za nju napravljen sustav turbinske regulacije.

Kako bi mogli dobro upravljati hidroelektranama potrebno je regulirati ponašanje turbine, a to se postiže reguliranjem otvora privodnog kola. Ovisno o režimu rada hidroelektrane može se regulirati brzina vrtnje turbine i snaga. Najvažnije je dobro podesiti regulator otvora privodnog kola, pa pomoću njega ostale regulatore. Budući da se regulator sastoji od tri različita regulatora svakog je potrebno posebno podesiti i ispitati. Najbolje ponašanje, najbrži odziv i najmanje oscilacija, daje regulator otvora privodnog kola. to je očekivano ponašanje jer je taj regulator najjednostavniji te ne postoji velika inercija i kašnjenje kao u slučaju regulatora brzine vrtnje. Regulator brzine vrtnje daje sporiji odziv i veće oscilacije, od regulatora otvora privodnog toka, što je posljedica velike inercije turbine te malih otpora na ležajevima turbine.

National Instruments cRIO platforma vjerno je poslužila za simulaciju hidroelektrane. Bez ikakvih grešaka ili gubitaka je brzo i u stvarnom vremenu slala signale prema regulatoru i primala vrijednost upravljačkog signala za zatvaranje i otvaranje otvora privodnog kola. Također je preko programa LabView napravljena vrlo vjerni simulacijski model hidroelektrane pomoću kojeg su izračunate sve mjerene veličine poput otvora privodnog kola, brzine vrtnje turbine te električne snage hidroelektrane.

Sva testiranja provedena su korištenjem hardware-in-the-loop metode ispitivanja čime je potvrđeno da sustav turbinske regulacije daje vrlo dobro ponašanje sustava u svim ispitivanim situacijama te ne pokazuje pojavu nikakvih grešaka. Nakon ispitivanja provedenih HIL metodom potrebno je, u hidroelektrane, provesti dodatna ispitivanja budući da se neke situacije ipak ne mogu ispitati preko simulacije. Također je potrebno i fino podesiti regulator. Složeniji model ne bi riješio problem dodatnog namještanja regulatora zbog nedovoljno točno određenih parametara sustava u trenutku provedbe ispitivanja. Također je moguća pojava malih oštećenja na

dovodnom sustavu ili turbini koji mogu utjecati na ponašanje sustava, a dogodila su se nakon mjerenja parametara hidroelektrane.

Ovaj sustav turbinske regulacije dobro upravlja hidroelektranom te se pokazalo da može izdržati sva testirana opterećenja bez pojave oštećenja na turbini, prekida rada hidroelektrane ili dovođenja sustava u nestabilno stanje.

## Literatura

- [1] Bakarić V., Mišković I., Horvat K., HIL ispitivanja turbinske regulacije HE Lečće, Cavtat, 2011.
- [2] V. Bakarić, I. Mišković, K. Horvat K., Hydroelectric Power Unit Simulator for Turbine Governor Testing, Brodarski institut, Zagreb
- [4] „HE na Krki“, HEP Proizvodnja d.o.o., [www.hep.hr](http://www.hep.hr), 2012.
- [5] About Hardware-In-the-Loop Simulation,  
<http://www.opal-rt.com/about-hardware-loop-simulation>, 1. Lipanj 2016.
- [6] LabVIEW System Design Software, <http://www.ni.com/labview/>, 28. Svibanj 2016.
- [7] SIMATIC STEP 7 Professional, <http://w3.siemens.com/mcms/simatic-controller-software/en/step7/step7-professional/pages/default.aspx>, 3. Lipanj 2016.

## **Sažetak**

Svrha ovog diplomskog rada je napraviti sustav turbinske regulacije za hidroelektranu Golubić koja se nalazi na rijeci Butišnici, pritoci rijeke Krke. Simulacijski model je napravljen u programskom okruženju Labview te je prebačen na National Instruments cRIO platformu koja provodi zadane algoritme i izmjenjuje podatke s okolinom u stvarnom vremenu. Regulator je napravljen na PLC-u te se sastoji od tri regulatora, PI regulatora otvora privodnog kola te PID regulatora brzine vrtnje spojenog u paralelu s PI regulatorom snage. Testiranja su provedena u hardware-in-the-loop načinu testiranja te je napravljeni regulator spreman za uporabu u hidroelektrani uz potrebu finog podešavanja na samoj hidroelektrani.

**Ključne riječi:** hidroelektrana, HIL simulacija, turbinska regulacija, cRIO platforma, Labview



## Summary

The purpose of this master thesis is to make a turbine control system for hydroelectric power plant Golubić, which is located on the river Butišnica, a tributary of the river Krka. The simulation model was made in the programming environment Labview and was afterwards transferred to the National Instruments cRIO platform that implements the default algorithms and exchanges data with the environment in real time. The controller is designed on PLC and consists of three controllers, PI wicket gate controller and PID speed controller that are connected in parallel with the PI controller. The tests are performed in hardware-in-the-loop testing mode and the designed controller just needs to be fine-tuned and is then ready to use on the hydroelectric power plant.

**Key words:** hydropower plant, HIL simulation, turbine regulation, cRIO platform, Labview