

HIDRAVLIČNI PREHODNI POJAVI – PROBLEMATIKA OBNOVE HIDROELEKTRARN S KOMPLEKSNIMI PRETOČNIMI SISTEMI

HYDRAULIC TRANSIENT EVENTS – PROBLEMATICS OF RENOVATION OF HYDROPOWER PLANTS WITH COMPLICATED CONVEYANCE SYSTEMS

Jernej Mazij, univ. dipl. inž. grad.

jernej.mazij@litostrajpower.eu

dr. Anton Bergant, univ. dipl. inž. str.

anton.bergant@litostrajpower.eu

Litostroj Power, d. o. o., Litostrojska cesta 50

SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Strokovni članek

UDK 621.311.21(497.4)

Povzetek | Hidravlični prehodni pojav pomeni spremembo hidrodinamičnih količin obravnavanega hidravličnega pretočnega sistema. Obravnavanje prehodnih pojavov je ključno z vidika varnega obratovanja hidroelektrarne in ustrezne zasnove posameznih turbinskih komponent, pripadajoče hidromehanske opreme in elementov pretočnega sistema. Obseg analize hidravličnih prehodnih pojavov je odvisen od kompleksnosti hidravličnega pretočnega sistema, zahtev naročnika, faze projekta in tipa vgrajene turbinske in hidromehanske opreme. Rezultati analize nam podajo celovit vpogled v delovanje hidroelektrarne v času prehodnih pojavov, omogočajo določiti kritične obratovalne režime, možne omejitve obratovanja in ustrezne metode za blaženje negativnih posledic hidravličnih prehodnih pojavov. Za zagotavljanje visoke stopnje zanesljivosti in natančnosti mora imeti odgovorni inženir za izdelavo analize široko interdisciplinarno znanje s področij gradbeništva, strojništva in elektrostroke. Praktični pristop je prikazan pri dveh industrijskih primerih. To sta obnova hidroelektrarne Doblar I in hidroelektrarne Moste, ki imata obe za pogonske agregate vgrajene Francisove turbine. Ključne besede: hidravlični prehodni pojavi, Francisova turbina, hidroelektrarna, hidravlični pretočni sistem, primerjava izračuna z meritvijo.

Summary | Hydraulic transient events are the changes of hydrodynamical quantities in the water conveyance system. The treatment of hydraulic transient events is essential to ensure the safe operation of the hydropower plant and suitable design of the turbine components and appurtenant hydromechanical equipment. The extent of the analysis depends on the particular customer specifications, the complexity of the water conveyance systems, design phase, the type of the mechanical and hydromechanical equipment installed. The results of the analysis give us a comprehensive insight into the hydropower plant operation during transient events, critical operation regimes, possible limitations of operation and suitable methods for transient control. In order to assure a high level of reliability and accuracy, the responsible engineer must have a broad interdisciplinary range of knowledge in civil, mechanical, and electrical engineering. A practical implementation is presented on two case studies: the refurbishments of Doblar I HPP and Moste HPP. Both hydropower plants are equipped with Francis turbine units.

Key words: hydraulic transient analysis, Francis turbine, hydropower plant, water conveyance system, numerical results and measurement comparison

1 • UVOD

Namen članka je s primeri obnove hidroelektrarn gradbenim inženirjem in tehnikom predstaviti problematiko hidravličnih prehodnih pojavov. V prvem delu članka se osredotočimo na kritične obratovalne režime in metode blaženja negativnih posledic hidravličnih prehodnih pojavov z dodatnim pregledom uporabljenih teoretičnih modelov in opisom Francisove turbine kot hidravličnega turbinskega stroja. V drugem delu predstavimo praktično uporabo komerci-

alnega računalniškega programa in primerjavo med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi hidrodinamičnih količin, opravljeno v podjetju Litostroj Power iz Ljubljane, ki ima pri analizah in raziskavah hidravličnih prehodnih pojavov v črpalnih in turbinskih sistemih več kot 50-letno tradicijo.

Hidravlični prehodni pojav povzroči motnja, katere posledica je sprememba stacionarnega stanja. Tu obravnavamo prehodne pojave pri toku pod tlakom, kjer kot delovni medij

nastopa voda. Posledice prehodnih pojavov so lahko poškodbe na turbinski in hidromehanski opremi, na segmentih pretočnega sistema ali motnje v obratovanju. Za lastnike in upravljavce hidroelektrarn to pomeni visoke stroške v obliki dragih popravil, pogostejšega vzdrževanja in manjše proizvodnje električne energije (HydraTek, 2009). Ozaveščenost o nevarnostih prehodnih pojavov je v zadnjih nekaj desetletjih napredovala, še posebno po uveljavitvi osebnih računalnikov, razvoju komercialnih programskih paketov in širitvi v druga tehnična področja, kjer so prisotni prehodni pojavi (veter, električna omrežja, tok s prosto gladino).

2 • PREHODNI POJAVI V HIDROELEKTRARNAH

Glavni vzrok za nastanek prehodnih pojavov v hidroelektrarnah so pogonski manevri turbine. V stacionarnem stanju je obremenitev turbine enaka obremenitvi generatorja, zato se mora krmilnik turbine odzvati na vsako spremembo obremenitve, saj se drugače spremenijo vrtilna frekvenca, pretok in tlak v sistemu. Po vsakem manevru pa motnje v sistemu trajajo še nekaj časa po vzpostavitvi novega ravnovesnega stanja kot nihanja, ki se zaradi trenja zadušijo. Ekstremne tlačne pulzacije v pretočnem sistemu in vrtilno frekvenco turbine pa je treba omiliti, kar se doseže z ustreznimi obratovalnimi manevri (odpiranje in zapiranje vodilnika turbine) in vgradnjo zaščitne opreme.

2.1 Hidravlični turbinski stoji

Hidravlični turbinski stroji so pogonske enote hidroelektrarn, katerih naloga je izkoriščanje

vodne energije za proizvodnjo električne energije.

Najprimernejši tip hidravličnega turbinskega stroja določimo na podlagi hidroloških in geomorfoloških lastnosti lokacije, ekonomskih vidikov proizvodnje, dinamike obratovanja, stroškov vzdrževanja in varnosti. Poznamo naslednje običajne tipe hidravličnih turbinskih strojev: Peltonove turbine, Francisove turbine, Kaplanove turbine in cevne turbine. Poleg izraza turbina lahko uporabljamo besedo agregat kot skupno ime za zaključeno celoto. Francisova turbina spada med radialno-aksialne turbine. Voda vteka v gonilnika v radialni smeri in ga zapušča v aksialni smeri. Vsa potencialna energija vode se ne pretvori v kinetično, zaradi česar sodijo Francisove turbine med nadtladne ali reakcijske turbine. Konstrukcijska izvedba je možna s horizontalno ali vertikalno gradnjo,

pri horizontalni izvedbi je gonilnik lahko enojen ali dvojen. Francisova turbina je primerna za široko obratovalno območje padcev in pretokov, zato spadajo tovrstne turbine med najbolj razširjene (Nicolet, 2007).

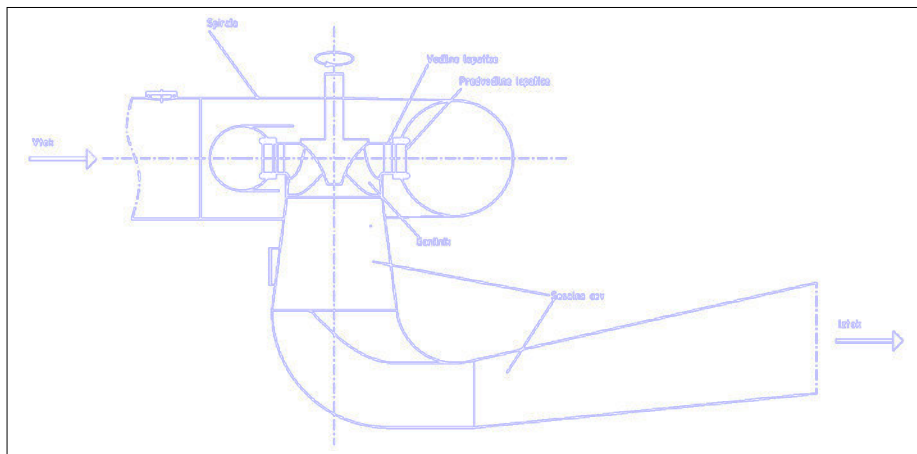
Pomembni sestavni deli Francisove turbine so prikazani na sliki 1.

Naloge posameznih gradnikov so naslednje:

- Spiralno ohišje omogoča nastanek vodnega vrtinca in enakomerno porazdeli tok vode na predvodilne lopatice.
- Predvodilne lopatice so fiksno pritrjene na zgornji in spodnji predvodilnikov obroč. Z ustrezno hidravlično obliko usmerjajo vodni tok na vodilne lopatice.
- Vodilne lopatice so gibljive in usmerjajo vodo na gonilnik. S spreminjanjem njihovega kota s servomotorjem vodilnika se spreminja širina pretočnega prereza med posameznimi lopaticami – odprtje vodilnika. S tem uravnavamo pretok in vpadni kot vodnega toka na gonilnik.
- Gonilnik: pretvarja vodno energijo (potencialno in kinetično) v mehansko energijo. Gonilnik se vrti zaradi odklanjanja vodnega vrtinca iz njegove smeri gibanja in zaradi reakcijskega pritiska, ki je posledica izgonilnika izstopajoče vode.
- Sesalna cev: zaključi pretočni trakt turbine, z njo poskušamo izkoristiti del kinetične energije pri izstopu iz gonilnika. To omogoča izkoriščanje celotnega razpoložljivega padca, vključno z višino med gonilnikom in spodnjo vodo.

Teoretična razpoložljiva hidravlična moč turbine P_h je določena z naslednjo enačbo:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_T \cdot H_n, \quad (1)$$



Slika 1 • Sestavni deli Francisove turbine

kjer so ρ gostota vode (kg/m^3), g gravitacijski pospešek (m/s^2), Q_T pretok turbine (m^3/s) in H_n neto padec (m).

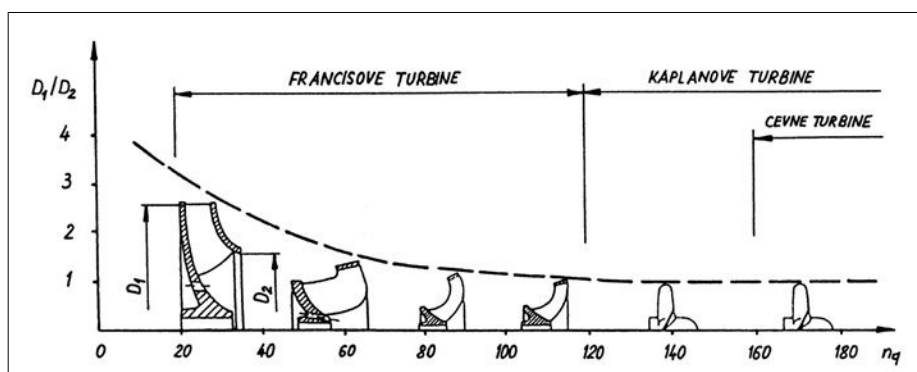
Dejanska pridobljena moč je nižja zaradi izgub, ki se pojavijo pri obratovanju turbine. Izkoristek turbine η predstavlja razmerje med dejansko pridobljeno močjo P_b , ki jo dobimo na gredi turbine, in razpoložljivo hidravlično močjo turbine P_r .

$$\eta = \frac{P_b}{P_r} \quad (2)$$

Izkoristek turbine izmerimo na modelu turbine v certificiranem hidravličnem laboratoriju in ga prikažemo v obliki školjčnega diagrama (Benišek, 1998). Izjemno pomembno vlogo v teoriji hidravličnih turbinskih strojev imajo zakoni modelne podobnosti, saj omogočajo primerjave turbin različnih tipov in velikosti. Z njihovo pomočjo lahko iz eksperimentalnih rezultatov na modelu turbine napovemo lastnosti prototipa vgrajene turbine. Turbino enoznačno določimo in oblikovno opišemo s specifično vrtilno frekvenco n_q (Bergant, 2006):

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q_T}}{\sqrt[4]{H_n^3}} \quad (3)$$

kjer so n vrtilna frekvenca turbine (min^{-1}), Q_T pretok turbine (m^3/s) in H_n neto padec (m). Specifična vrtilna frekvenca turbine je konstanta vrednost in je definirana za optimalno obratovalno točko turbine (točko najvišjega izkoristka). Vpliv specifične vrtilne frekvence



Slika 2 • Vpliv specifične vrtilne frekvence na izbiro reakcijske turbine (Bergant, 2006)

na izbiro primerne reakcijske turbine je prikazan na sliki 2.

S slike je razvidno, da se z naraščanjem specifične vrtilne frekvence spreminja primeren oblika turbine, radialna turbina prehaja v aksialno. S specifično vrtilno frekvenco je povezana tudi značilna oblika Francisove turbine. Francisove turbine z majhnimi vrednostmi specifične vrtilne frekvence imajo manjšo višino vstopnega roba, vstopni premer na vencu pa je večji kot izstopni na pestu.

2.2 Kritični obratovalni režimi

Obremenitve, ki so posledica hidravličnih prehodnih pojavov, nastanejo zaradi različnih obratovalnih režimov. Razdelimo jih glede na stopnjo nevarnosti za pretočni sistem hidroelektrarne ((Chaudhry, 2014), (Wylie, 1993)):

(i) Normalni obratovalni režimi

Vsi varnostni elementi v sistemu delujejo ustrezno glede na svoje načrtovane funkcije. Ti režimi zajemajo zagon hidroelektrarne in priključitev na omrežje, razbremenitev s krmilnikom, hitro zaporo turbine.

(ii) Varnostni obratovalni režimi

V tem primeru se okvari eden od varnostnih elementov, kar lahko povzroči delni pobeg turbine in zapiranje predturbinske lopute ali kroglastega zasuna.

(ii) Izjemni obratovalni režimi

Na hidroelektrarni se okvari večje število varnostnih elementov na najbolj neugoden način. To povzroči polni pobeg turbine ali zapiranje vodostanske lopute pod maksimalnim pretokom. Za zmanjšanje posledic kritičnih obratovalnih režimov so potrebni varnostni in omilitveni ukrepi.

3 • VARNOSTNI IN OMILITVENI UKREPI

Varnostni elementi in omilitveni ukrepi za blaženje negativnih posledic prehodnih pojavov morajo izpolnjevati naslednje pogoje (ASME, 1996):

- zagotoviti najvišjo možno stopnjo varnosti hidroelektrarne za vse predvidene obratovalne režime,
- določiti in upoštevati ustrezne mejne vrednosti za specifične obratovalne parametre,
- identificirati najbolj neugodne obratovalne režime in zagotoviti, da mejne vrednosti obratovalnih parametrov ne bodo presežene.

Operativni, varnostni in gospodarski dejavniki so odločilni pri izbiri zaščite pred nezaželenimi učinki prehodnih pojavov, največkrat je najboljša rešitev hkratna uporaba naslednjih pristopov (Bergant, 1997):

- sprememba obratovalnih manevrov. To vključuje ustrezno določitev primernih manevrov vodilnih lopatic in časovnih intervalov zapiranja/odpiranja loput ali kroglastih zasunov. Uveljavljen je dvostopenjski način zapiranja vodilnih lopatic z dodatnim dušenim gibom servomotorja vodilnika (IEC 60308, 2005). Sprememba obratovalnih manevrov je najučinkovitejša in stroškovno najbolj ugodna metoda za blaženje negativnih posledic prehodnih pojavov v primeru obnove hidroelektrarne.
- vgradnja varnostnih elementov v pretočni sistem in turbino: povečana vztrajnost rotirajočih delov turbine, vtočni ali iztočni vodostan, tlačni regulator, tlačna membrana, zračni ventil. Vgradnja varnostnih elementov je primerna pri gradnji novih

hidroelektrarn in v manjši meri pri obnovi obstoječih hidroelektrarn.

- ustrezno načrtovanje pretočnega sistema hidroelektrarne skupaj s spremembo obratovalnih manevrov je najbolj učinkovita metoda pri gradnji novih hidroelektrarn, medtem ko so stroški takih posegov pri obnovi preveliki.

4 • MODERNI PRISTOP OBRAVNAVE

Zaradi dinamičnega obratovanja hidroelektrarne so prehodni pojavi neizogibni. Motnje v delovanju, zagonu, zaustavitvi ali spremembi obremenitve so prisotni celotno dobo obratovanja. Naloge odgovornega inženirja za izdelavo analize prehodnih pojavov so identifikacija in obravna obratovalnih režimov, ki lahko predstavljajo nevarnost za varno obratovanje in priprava rešitve. Iz navedenega obsega kritičnih obratovalnih režimov in možne uporabe varnostnih elementov (poglavji 2.2 in 3) izhaja, da mora imeti odgovorni inženir široko interdisciplinarno znanje na različnih področjih:

(i) gradbeništvo (vodna hidravlika in vodne zgradbe), (ii) strojništvo (hidravlični turbinski stroji, hidromehanska in pomožna oprema), (iii) elektrotehnika (generatorji, krmiljenje moči in distribucijski sistemi). Obseg analize je odvisen

od posebnih zahtev naročnika, tipa turbinskega stroja, kompleksnosti pretočnega sistema in faze projektiranja. Naročnik lahko določi obseg analize glede na predvideni način obratovanja hidroelektrarne. Tip vgrajenega turbinskega stroja pogojuje uporabo karakteristik in kompleksnost pretočnega sistema.

Hidroelektrarne z vgrajenimi Francisovimi in Peltonovimi turbinami imajo na splošno bolj kompleksne pretočne sisteme (tuneli, cevovodi, vodostani, dodatni vtoki ...). Analiza je v zgodnji fazi načrtovanja (idejna zasnova, idejni projekt) lahko izdelana s poenostavljenimi analitičnimi modeli, ki temeljijo na izkušnjah, smernicah in pravilnikih ((Chaudhry, 2014), (Wylie, 1993), (Pejović, 1987)). V tej fazi že lahko izberemo ustrezne varnostne elemente in postopke za blaženje negativnih posledic prehodnih po-

javov, še posebno spremembo vzdolžnega profila pretočnega sistema, lokacijo in osnovne parametre varnostnih elementov. V kasnejši fazi (projekt za izvedbo) uporabljamo komercialne ali lastniške, t. i. in-house programske pakete, da določimo kritične obratovalne režime in končne parametre in lokacijo varnostnih elementov. Vključeni naj bodo obratovalni režimi pri maksimalnih pretokih in padcih za obratovanje ene ali več enot hkrati, odpoved ene ali več varnostnih elementov in neugodno zaporedje dogodkov. Ti rezultati predstavljajo osnovo za izdelavo analize tveganja (Zobeiri, 2011). V času zagonskih preizkusov pa odgovorni inženir predstavlja podporo ekipi na terenu z dodatnimi analizami v primeru, da se robni pogoji na terenu razlikujejo od tistih v projektu za izvedbo.

5 • NUMERIČNI MODEL HIDRAVLICNIH PREHODNIH POJAVOV

V podjetju Litostroj Power za analizo hidravličnih prehodnih pojavov v cevni sistemih uporabljamo programski paket SIMSEN (EPFL, 2009). Programski paket ima modularno zgradbo in omogoča analizo sistema s poljubno topologijo. Moduli v programskem paketu predstavljajo posamezne elemente v sistemu, kjer vsaka enota vsebuje sklop diferencialnih enačb, ki opisujejo obnašanje posameznega elementa. Globalni sklop diferencialnih enačb rešujemo s sistemom Runge-Kutta četrte stopnje (Nicolet, 2009). Hidravlični elementi so modelirani na podlagi RLC-električnega tokokroga s pomočjo impendancne metode (Jaeger, 1977), kjer

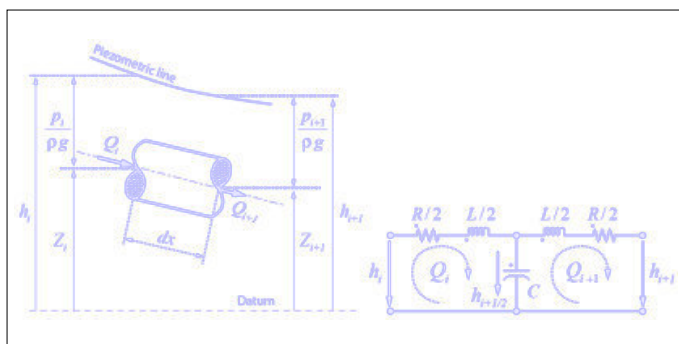
spremenljivki piezometrična tlačna višina H v vozlišču in pretok Q skozi posamezni element ustrezata električni napetosti U in električnemu toku i v enakovredni električni shemi. Dinamična in kontinuitetna enačba predstavljata osnovo za enakovredno modeliranje z električnim tokokrogom, kot je prikazano na sliki 3.

Električna analogija med modeliranjem širjenja tlačnih valov v cevovodih pod tlakom in napektnih valov v električnih vodnikih omogoča vpeljavo upornosti R , induktivnosti L in kapacitivnosti C (Nicolet, 2007). V odseku cevovoda z dolžino dx je kapacitivnost C povezana z akumulacijskim učinkom narastka tlaka in

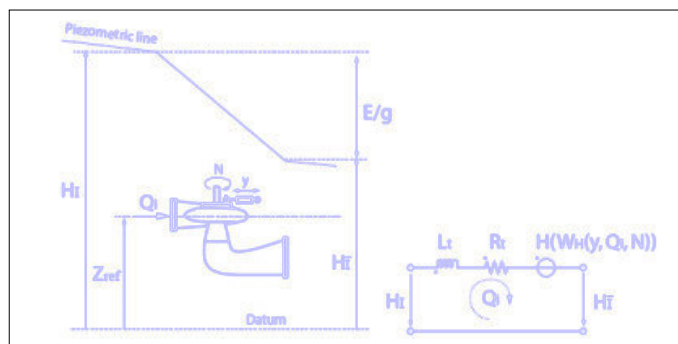
je funkcija hitrosti tlačnih valov, induktivnost L zajema maso vode v cevi, upornost R pa upošteva trenjske izgube v cevi.

Francisova turbina na sliki 4 je s stališča modeliranja, na podlagi RLC električnega tokokroga, tlačni element. Vpliv vztrajnosti vodne mase upoštevamo z vpeljavo induktivnega člena L_t , upornost R_t zajema vpliv zapiranja vodilnih lopat. Element tlaka H se spreminja na podlagi turbinske karakteristike.

S predpostavko, da prehod med dvema obratovalnima točkama turbine ustreza nizu stacionarnih obratovalnih točk, lahko prehodne pojave v turbini ustrezno modeliramo s stacionarno karakteristiko turbine (školjčni diagram). Za potrebe analize SIMSEN uporablja brezdimenzijske turbinske karakteristike n_{11} , M_{11} in Q_{11} . Rezultate numeričnega modeliranja bomo prikazali za dve slovenski HE v nadaljevanju.



Slika 3 • Modeliranje cevovoda z dolžino dx (levo) in ustrezna enakovredna shema električnega tokokroga (desno) (Nicolet, 2009)



Slika 4 • Model Francisove turbine (levo) in ustrezna enakovredna shema električnega tokokroga (desno) (Nicolet, 2009)

6 • HIDROELEKTRARNA DOBLAR I

Hidroelektrarna (HE) Doblar I je kombinirana akumulacijsko-pretočna hidroelektrarna na reki Soči. Začetki raziskovalnih del za gradnjo segajo v leto 1936, ko sta bila določena mesto za jez v soteski pri naselju Podselo in lokacija strojnice v kraju Doblar (SENG, 2014). Prvotno je bila v strojnici vgrajena oprema italijanskega proizvajalca Riva Milano in je do leta 1947 proizvajala električno energijo za italijansko omrežje z omrežno frekvenco 42 Hz. Leta 1950 je elektrarna v povezavi z ostalim slovenskim omrežjem prešla na omrežno frekvenco 50 Hz (IBE, 2008). V agregat št. 1 je bila leta 2001 vgrajena nova turbina proizvajalca Litostroj.

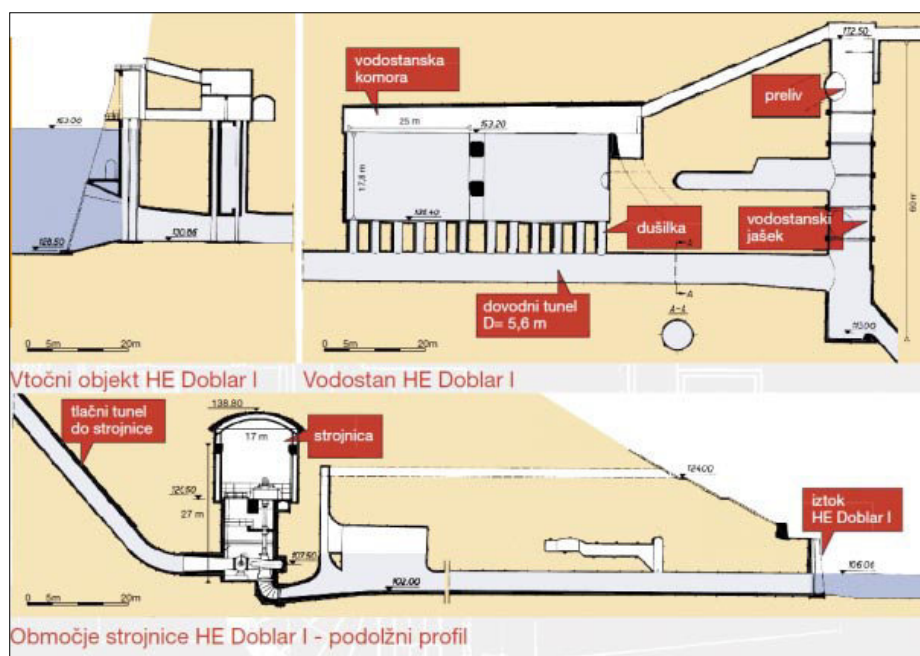
Zaradi zastarelosti je bila potrebna temeljita prenova turbinske, hidromehanske in pomožne opreme. Prenova je potekala v obdobju 2011–2013, parametri novih turbin so prikazani v preglednici 1. Pretočni sistem hidroelektrarne je sestavljen iz naslednjih elementov: dovodni rov z dolžino 3735 m in premera 5,6 m, gorvodni vodostanski sistem, sestavljen iz dveh medsebojno povezanih vodostanov elipsoidne oblike (skupne površine 879,65 m², dušenje na vtoku in iztoku poteka preko 12 odprtín), in cilindrični vodostanski jašek notranjega premera 8,0 m. Elipsoidna vodostana in cilindrični vodostanski jašek so še dodatno povezani z rovom dolžine 46,0 m in spremenljivim premerom 5,0–6,0 m.

Trije vzporedni cevovodi dolžine 46 m in premera 3,0 m dovajajo pretok v strojnico, kjer so vgrajene tri vertikalne Francisove turbine, vsaka s svojim ločenim odvodnim sistemom dolvodnih vodostanov in odvodnih rolov.

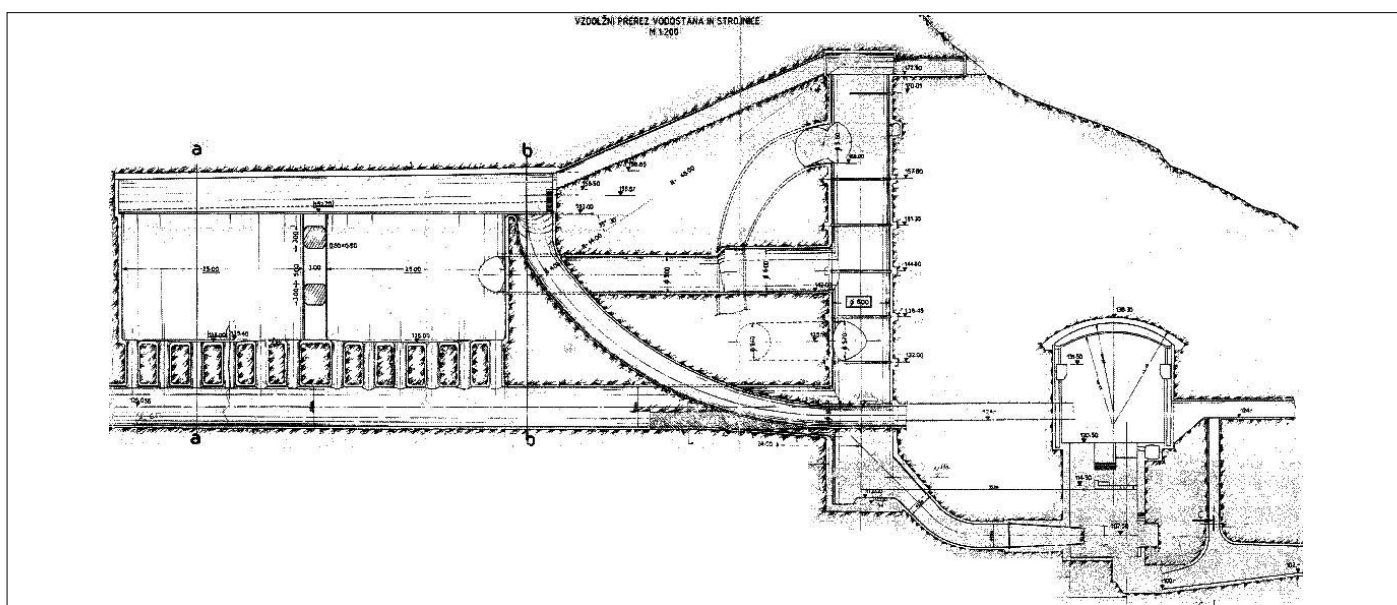
Vse turbine so opremljene s predturbinskimi kroglastimi zasuni premera 2,3 m.

Shema pretočnega sistema in konfiguracija gorvodnega vodostanskega sistema sta prikazani na slikah 5 in 6.

Zaradi starosti hidroelektrarne in zgodovinskega konteksta (sprememba državnega lastništva) je bila ena izmed glavnih ovir pri analizi pomanjkanje dokumentacije izvedenih del pretočnega in gorvodnega vodostanskega sistema. Kasnejše geodetske meritve so podale jasno sliko stanja, potrebno za ustrezno modeliranje in umerjanje računskega modela. Omejena razpoložljivost obstoječe dokumen-



Slika 5 • Shema pretočnega sistema HE Doblar I (SENG, 2014)



Slika 6 • Konfiguracija gorvodnega vodostanskega sistema HE Doblar I (IBE, 2008)

tacije v primerih obnove lahko povzroči zamude, nenatančno modeliranje in dodatne stroške. Naloga in odgovornost lastnika hidroelektrarne (naročnika analize) je, da priskrbi vso potrebno dokumentacijo.

V nadaljevanju bodo prikazani rezultati modeliranja različnih primerov obratovanja in primerjava z izmerjenimi veličinami.

6.1 Istočasna razbremenitev treh turbin

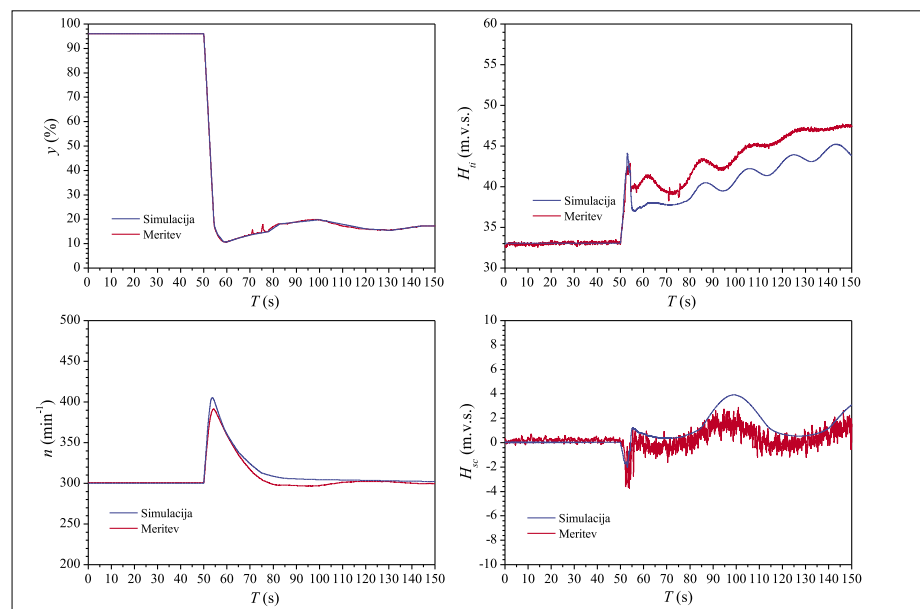
Istočasna razbremenitev z maksimalne moči na prosti tek je sprožena z izklopom generatorskega stikala. Elektromagnetni moment generatorja v trenutku pade na vrednost 0, rezultat je nenadna razbremenitev turbine in povečanje vrtilne frekvence agregata. V takem primeru turbinski krmilnik nadzira zapiranje servomotorja vodilnika s predpisanim dvostopenjskim načinom zapiranja, da se na turbini vzpostavi režim prostega teka. Turbine obratujejo v prostem teku in so pripravljene na obremenitev. Zapiranje vodilnika povzroči zmanjšanje pretoka in narastek tlaka v dovodnem cevovodu.

Tip turbine:	Francis FvT-2,127/320-11
Število turbin:	3
Maksimalni pretok turbine:	$Q_T = 25,00 \text{ m}^3/\text{s}$
Maksimalni bruto padec:	$H_b = 48,50 \text{ m}$
Maksimalna moč turbine:	$P_{maks} = 13,6 \text{ MW}$
Kota simetrale vodilnika:	$Z_{cl} = 107,25 \text{ m.n.m.}$
Izstopni premer gonilnika:	$D_{zv} = 2127 \text{ mm}$
Vrtilna frekvenca turbine:	$n = 300 \text{ min}^{-1}$
Vztrajnostni moment rotirajočih delov turbine (gonilnik, gred, generator):	$I = 84,7 \times 10^3 \text{ kgm}^2$

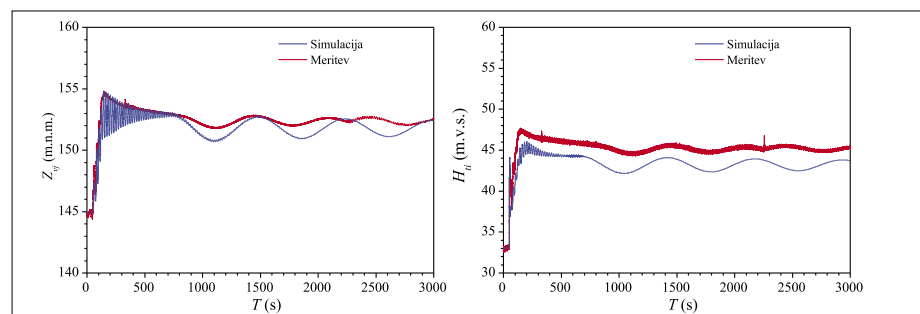
Preglednica 1 • Parametri turbine HE Doblar I

Za numerično modeliranje so bile upoštevane naslednje obratovalne razmere.

Enote obratujejo pri moči generatorja $P_{gen,1} = 11,0 \text{ MW}$, $P_{gen,2} = 12,0 \text{ MW}$, $P_{gen,3} = 10,2 \text{ MW}$ in nivoju zgornje vode $Z_{zg} = 152,4 \text{ m.n.m.}$ Rezultati za tlak v cevovodu pri vtoku v turbino (H_{ti}), vrtilno frekvenco turbine (n) in tlak v sesalni cevi (H_{sc}), ki so posledica giba servomotorja vodilnika (y), so prikazani na sliki 7 in veljajo za enoto 3 ($P_{gen,3} = 10,2 \text{ MW}$).



Slika 7 • Primerjava rezultatov simulacije in meritev za primer istočasne razbremenitve treh turbin – HE Doblar I



Slika 8 • Oscilacije v cilindričnem jašku in tlak v cevovodu pri vtoku v turbino za primer istočasne razbremenitve treh turbin – HE Doblar I

Iz prikaza na sliki 7 je razvidno, da je maksimalni izračunani (simulirani) tlak v cevovodu $H_{ti,maks,s} = 44,2 \text{ m.v.s.}$ višji od izmerjenega $H_{ti,maks,i} = 43,0 \text{ m.v.s.}$ Ta rezultat velja v obdobju zapiranja vodilnika, dinamika pa je prisotna tudi med obratovanjem v prostem teku turbine, ko tlak v cevovodu oscilira zaradi načrtovanega omilitvenega delovanja vodostana. Maksimalna izračunana vrtilna frekvenca agregata $n_{maks,s} = 405,5 \text{ min}^{-1}$ je višja od izmerjene $n_{maks,i} = 391,5 \text{ min}^{-1}$. Rezultati za tlak v sesalni cevi se zelo dobro ujemajo v stacionarnih pogojih obratovanja in v obdobju zapiranja vodilnika. Izračunani maksimalni tlak $H_{sc,maks,s} = 3,91 \text{ m.v.s.}$ je višji od izmerjenega $H_{sc,maks,i} = 1,83 \text{ m.v.s.}$ (povprečje konice tlakov).

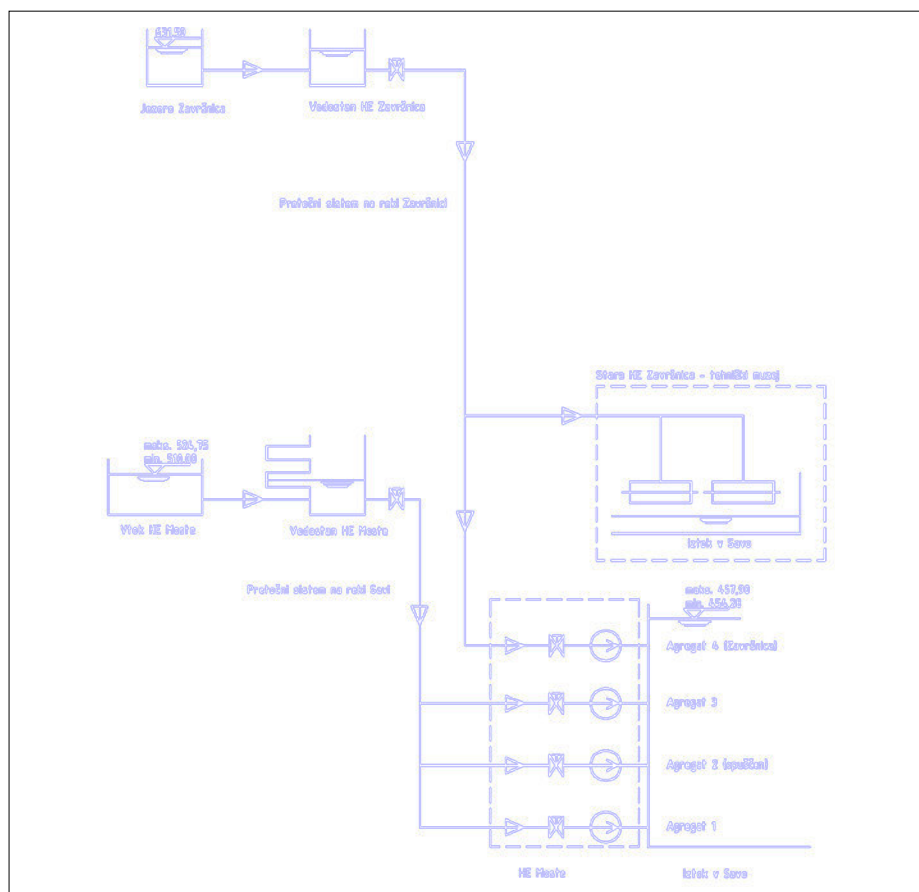
Izračunani minimalni tlak je $H_{sc,min,s} = -2,0 \text{ m.v.s.}$ in izmerjeni $H_{sc,min,i} = -1,55 \text{ m.v.s.}$ (povprečje konice tlakov). Pri zapiranju vodilnika in obratovanju na nominalni vrtilni frekvenci so pri meritvi tlaka v sesalni cevi prisotne visokofrekvenčne pulzacije (šum). Slika 8 prikazuje primerjavo meritev in numeričnih rezultatov za oscilacije glavin v cilindričnem vodostanskem jašku (Z_{vj}) in tlaka v cevovodu na vtoku v turbino za daljši časovni interval.

Rezultati izračunanih in izmerjenih vrednosti nihanja vodne gladine se zelo dobro ujemajo v času zapiranja vodilnika. Vodostan elipsoidne oblike med časom zapiranja vodilnika nima vpliva na tlak v cevovodu. Njegov vpliv je opazen kasneje kot dviganje gladine v vodnem jašku, ki je posledica dotoka vode iz elipsoidnega vodostana preko povezovalnega rova. Odstopanje med izračunano in izmerjeno vrednostjo tlaka v cevovodu bi lahko pripisali poenostavljenemu modeliranju sistema vodostanov in negotovim podatkom za vtočno-iztočne izgube na dušilkah elipsoidnih vodostanov.

7 • HIDROELEKTRARNA MOSTE

Hidroelektrarna Moste obratuje kot prva gorvodna elektrarna na reki Savi od leta 1952. Pregrada je betonska, ločno-težnostna in leži v soteski Kavčke, ki predstavlja najožji del savskega kanjona. S 60 m višine je tudi najvišja pregrada v Sloveniji. Akumulatorski bazen omogoča tedensko izravnavo pretokov. HE Moste je akumulacijska hidroelektrarna za proizvodnjo vršne energije in skupaj z ločenim agregatom, ki izkorišča energetske potencial

potoka Završnica, sestavlja enotni energetski sistem, kot je prikazan na sliki 9. V strojnici HE Moste so bili prvotno vgrajeni trije agregati, kasneje pa je bil dodatno vgrajen četrti agregat (črpalka–turbina) s priključitvijo na dovodni cevovod HE Završnica (Savske Elektrarne, 1994). Ta je bil v črpalnem režimu namenjen prečrpanju savske vode v višjeležeči bazen Završnica. Zaradi onesnaženosti Save je bil črpalni režim kasneje opuščen in novi



Slika 9 • Pretočni sistem na reki Savi in Završnici

Tip turbine:	Francis FvT–1,350/300–15
Število turbin:	2
Maksimalni pretok turbine:	$Q_T = 13,00 \text{ m}^3/\text{s}$
Maksimalni bruto padec:	$H_b = 68,91 \text{ m}$
Maksimalna moč turbine:	$P_{maks} = 7,5 \text{ MW}$
Kota simetrale vodilnika:	$Z_{CL} = 457,53 \text{ m.n.m.}$
Izstopni premer gonilnika:	$D_{2v} = 1350 \text{ mm}$
Vrtilna frekvenca turbine:	$n = 500 \text{ min}^{-1}$
Vztrajnostni moment rotirajočih delov turbine (gonilnik, gred, generator):	$I = 20,25 \times 10^3 \text{ kgm}^2$

Preglednica 2 • Parametri turbine HE Moste

agregat obratuje samo kot klasična turbina. V obdobju 2009–2010 sta bila obnovljena dva agregata, prostor tretjega pa je bil namenjen gradbenim ojačitvam strojnice HE Moste. Prehodni pojavi so bili obravnavani v pretočnem sistemu na reki Savi, ki obsega: dovodni rov z dolžino 840 m in notranjim premerom 3,0 m, vodostan s spodnjo in zgornjo stransko komoro, vodostansko loputo, tlačni cevovod z dolžino 152,5 m in notranjim premerom 2,6 m – do razcepa, od koder ločeni cevi dovajata pretok v strojnico, kjer sta vgrajeni dve vertikalni Francisovi turbini. Obe turbini sta opremljeni s predturbinskimi loputami premera 1,6 m. Parametri obnovljenih turbin so prikazani v tabeli 2. Predstavljeni so rezultati analize za dva obratovalna režima: razbremenitev turbin in zapiranje predturbinskih loput.

7.1 Istočasna razbremenitev dveh turbin

Ta analiza upošteva začetno stanje, ko enoti obratujeta pri moči generatorja $P_{gen} = 6,7$ MW in pri nivoju zgornje vode $Z_{zg} = 524,75$ m.n.m. Rezultati za tlak v cevovodu pri vtoku v turbino (H_{tl}) vrtilno frekvenco turbine (n) in tlak v sesalni cevi, ki so posledica giba servomotorja vodilnika (γ), so prikazani na sliki 10.

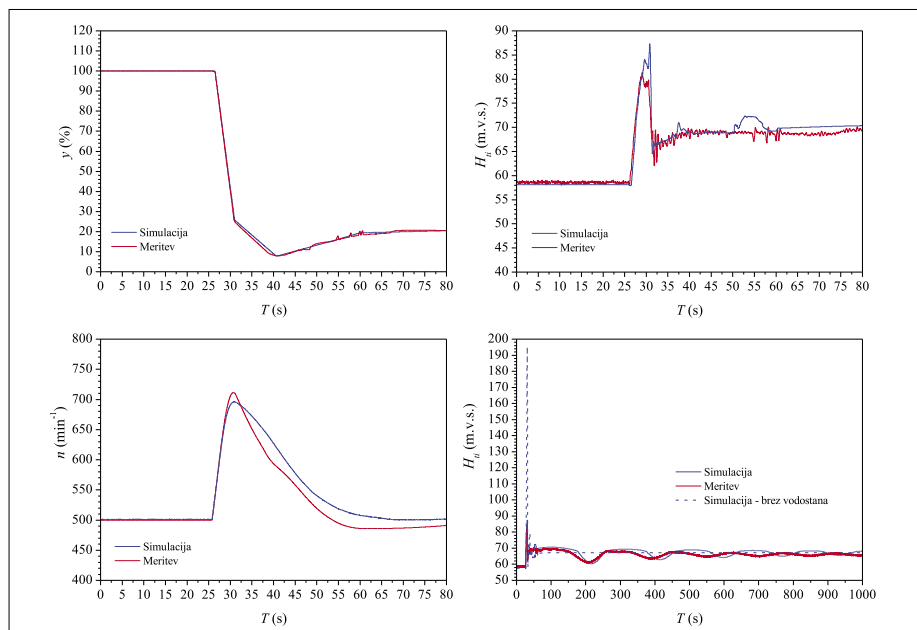
Maksimalni izračunani tlak v cevovodu $H_{li,maks,s} = 87,3$ m.v.s. je višji od izmerjenega $H_{li,maks,i} = 81,5$ m.v.s. in se pojavi v točki, ko servomotor vodilnika preide iz hitrega v dušeni gib, primerjava je zelo dobra v začetni fazi zapiranja vodilnika. Maksimalna izračunana vrtilna frekvenca agregata $n_{maks,s} = 711,5 \text{ min}^{-1}$ je višja od izmerjene $n_{maks,i} = 696,2 \text{ min}^{-1}$.

Na sliki 10 desno spodaj je predstavljen vpliv vodostana kot varnostnega elementa. Simulirana sta sistem brez vodostana in primerjava med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi; maksimalni tlak v sistemu z vodostanom ($H_{ti, maks, s} = 87,3$ m.v.s.) je znatno manjši od maksimalnega tlaka v cevovodu sistema brez vodostana ($H_{ti, maks, i} = 194$ m.v.s.).

Iz značilne oblike oscilacije tlaka v cevovodu je razvidno, da gladina vode v vodostanu doseže zgornjo komoro in se po približno $T = 180,0$ s spusti nazaj v vertikalni jašek. Oscilacije se zadržijo v časovnem intervalu, ki je daljši od $T_o = 1000$ s. Zaradi večjih hidravličnih izgub v dovodnem rovu od teoretičnih so izmerjene amplitude oscilacij manjše od izračunanih.

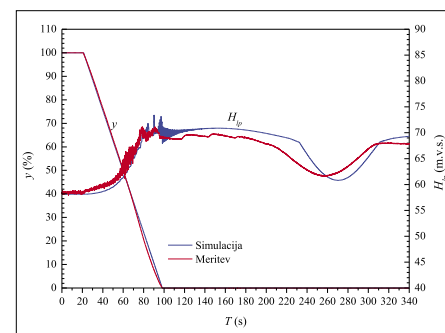
7.2 Istočasno zapiranje predturbinskih loput

Druga analiza upošteva začetno stanje, ko enoti obratujejo pri moči generatorja $P_{gen} = 6,7$ MW in pri nivoju zgornje vode $Z_{zg} = 524,75$ m.n.m. Loputa se zapira, kot je to predvideno, s predpisanim načinom obratovanja.



Slika 10 • Primerjava rezultatov simulacije in meritev za primer istočasne razbremenitve dveh turbin – HE Moste

Tlak na gorvodni strani lopute H_p in odprtje lopute ($\gamma = 100\%$ – loputa je popolnoma odprta) sta prikazana na sliki 11. Maksimalni izračunani tlak $H_{p,maks,s} = 73,4$ m.v.s. je rahlo višji od izmerjenega $H_{p,maks,i} = 71,5$ m.v.s. Razlika se povečuje proti manjši stopnji odprtja lopute, oscilacije tlaka so podobne kot v primeru hitre zapore.



Slika 11 • Primerjava rezultatov simulacije in meritev za primer zapiranja predturbinskih loput – HE Moste

8 • SKLEP

Predstavljena je problematika hidravličnih prehodnih pojavov v primeru obnov hidroelektrarn s kompleksnimi pretočnimi sistemi. Uvedba osebnega računalnika skupaj z namensko programsko opremo je povečala možnost določanja stopnje o nevarnosti hidravličnih prehodnih pojavov. Specifika hidroelektrarne kot

gradbenega objekta, vgrajene strojne opreme in načina delovanja v sklopu električnega omrežja zahtevajo široko interdisciplinarno znanje. Izbira varnostnih elementov in ustreznih postopkov za blažitev negativnih posledic hidravličnih prehodnih pojavov naj temelji na oceni varnosti, zanesljivosti in stroškov.

Predstavljena sta praktična primera opravljenih analiz v procesu obnove slovenskih hidroelektrarn; hidroelektrarne Doblar I na reki Soči in hidroelektrarne Moste na reki Savi. V obeh primerih predstavlja varnostni element vodostan, omilitveni ukrep pa dvostopenjski predpisani način zapiranja vodilnih lopatic. Rezultati modeliranja z ekvivalentnim električnim tokokrogom RLC se dobro ujemajo z rezultati terenskih meritev.

9 • LITERATURA

- ASME, The Guide to Hydropower Mechanical Design, HCI Publications, Kansas, 1996.
- Benišek, M., Hidraulične turbine, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.
- Bergant, A., Sijamhodžić, E., Water hammer problems related to refurbishment and upgrading of hydraulic machinery, Proceedings of the Conference Hydropower in the Next Century, Portorož, Aqua Media International, str. 611–622, 1997.
- Bergant, A., Obratovanje hidravličnega stroja med prehodnimi pojavi, Litostroj E.I. in Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 2006.
- Chaudhry, M.H., Applied Hydraulic Transients, Springer, New York, 2014.
- EPFL, Programski paket SIMSEN, verzija 2.3 standard (Hidro verzija 1.9.4), Lausanne, 2009.
- HydraTek, Applied Hydraulic Transient FAQ, HydraTek, Woodbridge, 2009.
- IBE, Tenderska dokumentacija HE Doblar I, Zahteve Naročnika – splošne tehnične specifikacije, LOT TG – Knjiga 3, Ljubljana, 2008.
- IEC 60308, Turbines hydrauliques – Essais des systèmes de régulation, International Electrical Commission, Geneve, 2005.
- Jaeger, C., Fluid Transients in Hydro-electric Engineering practice, Blackie, Glasgow, 1977.
- Mazij, J., Hidravlični prehodni pojavi v hidroelektrarnah z vgrajenimi Francisovimi turbinami, Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 2009.
- Nicolet, C., Avellan, F., Allenbach, P., Sapin, A., Simond, J. J., New tool for the simulation of transients phenomena in Francis turbine power plants, Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21st IAHR Symposium, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Lausanne, Switzerland, 2002.

Nicolet, C., Hydroacoustic Modelling and Numerical Simulation of Unsteady Operation of Hydroelectric Systems, Disertacija, EPFL, Lausanne, 2007.

Pejović, S., Boldy, A.P., Obradović, D., Guidelines to hydraulic transient analysis, Gower Technical Press Ltd., Aldershot, 1987.

Savske elektrarne Ljubljana, Bilten: Hidroelektrarne Moste, Mavčiče, Medvode, Vrhovo, Savske elektrarne Ljubljana, Ljubljana, 1994.

Soške elektrarne Nova Gorica, Brošura HE Doblar I, II, povzeto po: http://www.seng.si/medijsko_sredisce/predstavitvena_gradiva/, 12. 8. 2014.

Wylie, E. B., Streeter, V. L., Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.

Zobeiri, A., Nicolet, C., Vuandes, E., Risk analysis of the transient phenomena in a hydropower plant installation, Proceedings of the Conference Practical Solutions for a Sustainable Future, Prague, Aqua Media International, 2011.

PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2015

SEMINAR	IZPIT	
	Osnovni in dopolnilni	Revidiranje
9. - 11. 2. 2015	25. 3. 2015 (po potrebi še 24. 3.)	24. 3. 2015
	27. 5. 2015 (po potrebi še 26. 5.)	
5. - 7. 10. 2015	25. 11. 2015 (po potrebi še 24. 11.)	20. 10. 2015

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana;**

Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199; e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure:

ponedeljek, torek, sredo od 9.00 do 13.00 ure;

četrtek od 12.00 do 16.00 ure.

V petek NI URADNIH UR za stranke!

Seminar vključuje **izpitne programe** za:

1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. Investicijski procesi in vodenje projektov (za kandidate, ki opravljajo dopolnilni strokovni izpit; predavanje se odvija v okviru rednih seminarjev).
5. Kandidati drugih strok lahko poslušajo posamezna predavanja v okviru rednih seminarjev.

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS - MSG: <http://www.izs.si>, v rubriki »Strokovni izpiti«)

Cena za udeležbo na seminarju (za predavanje in literaturo) po izpitnih programih pod 1., 2. in 3. točko znaša 623,22 EUR z DDV, pod 4. točko pa 89,10 EUR z DDV. Cena za udeležbo na posameznem predavanju je 89,10 EUR z DDV.

Kotizacija za seminar je potrebno nakazati ob prijavi na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955**. Prijavo je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje **14 dni pred pričetkom** seminarja!

Prijavni obrazec je mogoče dobiti na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-dgits.si>).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20).

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana.**

Informacije o strokovnih izpitih in izpitnih programih je mogoče dobiti na spletni strani IZS <http://www.izs.si>, po telefonu (01) 547-33-19 (uradne ure: ponedeljek, sredo, četrtek, petek: od 10.00 do 12.00 ure; v torek od 14.00 do 16.00 ure) ali osebno na sedežu IZS (uradne ure: ponedeljek, sredo, četrtek, petek: od 8.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure).