

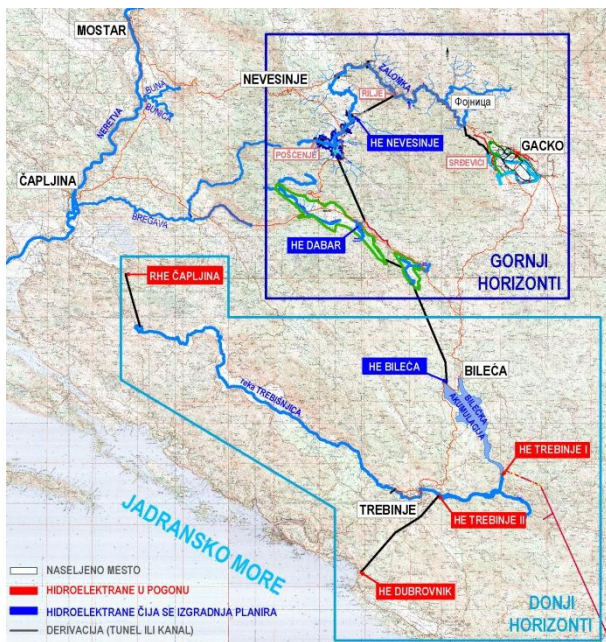
## ANALIZA PRELAZNIH REŽIMA NA DERIVACIONOM POSTROJENJU HE „NEVESINJE“

Dalibor DRAŠKOVIĆ<sup>1)</sup>, Radmilo GLIŠIĆ<sup>1)</sup>, Branislav KOLAREVIĆ,  
Milena LUČIĆ<sup>1)</sup>, Tamara ŠUMAR<sup>1)</sup>, Radivoj CVETIĆANIN<sup>1)</sup>, Marina DIMKIĆ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd

### REZIME

„Gornji Horizonti“ su naziv za jedan od najsloženijih vodoprivrednih i hidroenergetskih sistema na prostorima bivše Jugoslavije čiji proces projektovanja i izgradnje traje preko 40 godina. Ovaj sistem je lociran u jugoistočnom delu Bosne i Hercegovine i obuhvata 4 kraška polja koja se poput stepenica spuštaju ka Jadranskom moru. To su Gatačko, Nevesinjsko, Dabarsko i Fatničko polje.



Slika 1. Dispozicioni prikaz izgrađenih i planiranih objekata sistema „Gornji i Donji Horizonti“

Deo hidrosistema nazvan "Gornji Horizonti", obuhvata u konačnoj etapi korišćenje voda na pravcu Gatačko polje - reka Zalomka - Nevesinjsko polje - Dabarsko

polje - Fatničko polje - akumulacija Bileća. Sve vode sistema dovedene u akumulacioni bazen Bileća, mogu se na daljem padu od 400 m energetski koristiti do mora, preko već izgrađenih hidroelektrana HE Trebinje I, HE Trebinje II, HE Dubrovnik i RHE Čapljina, koje su sukcesivno ulazile u pogon počevši od 1965. (HE Dubrovnik), 1968. (HE Trebinje I), 1979. (RHE Čapljina) do 1981. (HE Trebinje II).

Vodoprivredni i hidroenergetski objekat „Nevesinje“ sačinjavaju: brana na pregradnom profilu „Rilje“ koji je lociran oko 23 km istočno od Nevesinja, akumulacija na reci Zalomci, derivaciona hidroelektrana „Nevesinje“ i dovodni sistem za prevođenje voda iz sliva reke Mušnice (Gatačko polje) u sliv reke Zalomke (Nevesinjsko polje). Osnovna uloga pomenute akumulacije je da se smanje poplave u Nevesinjskom polju, stanovništvo i industrija okolnih područja snabdeju sa zahtevanom količinom vode, omogući navodnjavanje kraških polja istočne Hercegovine i ostvari maksimalno moguća proizvodnja električne energije na sopstvenom derivacionom postrojenju kao i na nizvodnim, u budućnosti planiranim, hidroelektranama.

Hidroelektrana Nevesinje je u projektnim dokumentacijama različitih obrađivača i različitih nivoa obrade uvek egzistirala kao derivaciono postrojenje sa podzemnom mašinskom zgradom. Prema Osnovnom rešenju iz 1976. god. elektrana „Nevesinje“ je figurisala kao pumpno akumulaciono postrojenje čije su proizvodni agregati energetski prerađivali vodu reke Zalomke akumulirane u jezeru sa kotom normalnog uspora 966 mnm. Idejnim projektom HE „Nevesinje“ (Energoinvest, Sarajevo, 1985. god.) pumpno akumulaciona elektrana „Nevesinje“ preprojektovana je u klasičnu hidroelektranu pri čemu je uspor akumulacije sa 966 mnm izdignut na 970 mnm.

Derivacioni postrojenje HE „Nevesinje“ sastoji se od sledećih objekata: ulazna građevina, dovodni tunel, gornji vodostan, vodostanska zatvaračnica, vertikalni cevovod pod pritiskom, podzemna mašinska zgrada, donji vodostan, odvodni tunel i odvodni kanal.

Derivacione hidroelektrane sa podzemnom mašinskom zgradom poseduju manje ili više dugačak odvodni tunel pomoću kojeg se ostvaruje veza između sifonskog dela protočnog trakta turbine i nizvodnog rečnog korita. To nije slučaj kod derivacionih postrojenja sa nadzemnom mašinskom zgradom. S obzirom da se do podzemne mašinske zgrade voda transportuje dovodnim tunelom a do nizvodnog rečnog korita šalje odvodnim tunelom neophodno je predvideti objekte pomoću kojih se od hidrauličkog udara štiti oba tunela. I dok se za dovodni tunel najčešće projektuje gornji vodostan koji figuriše i kod derivacionih rešenja sa nadzemnom mašinskom zgradom za odvodni tunel neophodno je predvideti donji vodostan neposredno nizvodno od mašinske zgrade.

Osnovno pitanje koje se postavilo jeste da li se ugradnjom sinhronih ispusta u sklopu agregata mašinske zgrade HE „Nevesinje“ mogu toliko smanjiti dimenzije a time i investicije potrebne za izgradnju gornjeg i donjeg vodostana, da je moguće opravdati gubitke energije koji su neminovni pri svakom isključenju agregata (planiranog ili iznenadnog). Naime, prilikom ispada proizvodnih agregata sa mreže, naglo se zatvara predturbinski zatvarač a voda koja je prolazila kroz turbinu se ispušta kroz cev u vidu odvojka sa zatvaračem koji se može postepeno zatvarati. Vreme zatvaranja ovog zatvarača na sinhronom ispustu pretstavlja period kada se energetski neiskorišćena voda plasira u odvodni tunel a oscilacije vodnih masa u gornjem i donjem vodostanu višestruko smanje u odnosu na varijantno tehničko rešenje u kom ne figuriše sinhroni ispust.

Analizirane su dve varijante: varijanta 1 – bez sinhronog ispusta i varijanta 2 sa sinhronim ispustom na turbinskim vodovima HE „Nevesinje“. Posmatrano uporedno, u varijanti 1 bez sinhronog ispusta, objekti za zaštitu od hidrauličkog udara su većih dimenzija u odnosu na varijantu u kojoj sinhroni ispust egzistira. To znači da varijantu 1 karakterišu veća početna investiciona ulaganja u objekte, odsustvo gubitaka u proizvodnji i minimizacija automatizovanih radnji koje iz različitih razloga mogu da zakažu.

Razmatrane varijante derivacionog postrojenja HE „Nevesinje“ međusobno razlikuju kako u pogledu

investicionih troškova u periodu izgradnje i eksploatacije, tako i u pogledu ostvarene prosečne godišnje proizvodnje.

Nakon izvršene uporedne tehno-ekonomske analize projektni tim se opredelio za varijantu 1 bez sinhronog ispusta tj. za tehničko rešenje u koje na startu treba uložiti veća finansijska sredstva, ne toloko iz razloga povoljnijih ekonomskih pokazatelja, već zbog toga što se ovakvim rešenjem izbegavaju konstantni gubici u proizvodnji tokom eksploatacije ali i složeniji sistem manevrisanja sa mašinskom i hidromehaničkom opremom pri svakom zaustavljanju agregata. Takođe, ne treba zaboraviti da sinhroni ispust može da otkáže tj. da npr. ne dođe do otvaranja zatvarača na njemu u trenutku ispada sa mreže što bi imalo veoma loše posledice sa stanovišta oscilovanja vodnih masa u gornjem i donjem vodostan. Derivaciono postrojenje HE „Nevesinje“ bez sinhronog ispusta predstavlja pouzdaniji sistem kod kojeg su rizici svedeni na najmanju moguću meru a reakcija sistema na nepredviđene događaje nije povezana sa ljudskim faktorom niti sa bilo kojim vidom automatizovanih radnji koje iz različitih razloga mogu da zakažu.

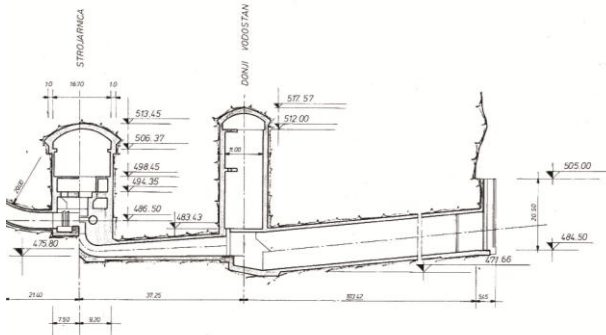
**Gljučne reči:** Gornji horizonti hidrosistema Trebišnjica, derivaciono hidroenergetsko postrojenje HE „Nevesinje“, objekti za zaštitu od hidrauličkog udara, sinhroni ispust

## 1. UVOD

Na prostorima bivše Jugoslavije projektovan je i izveden veliki broj podzemnih mašinskih zgrada ali dužine tunela pomoću kojih se sifon spaja sa nizvodnim rečnim koritom nisu značajne. Možda i najpoznatija podzemna mašinska zgrada sa odvodnim tunelom i donjim vodostanom za koji su rađena i hidraulička modelska ispitivanja je hidroelektrana „Piva“. U sklopu ove elektrane montirana su 3 Francis agregata ukupnog instalisanog proticaja  $3 \times 80 = 240 \text{ m}^3/\text{s}$ .

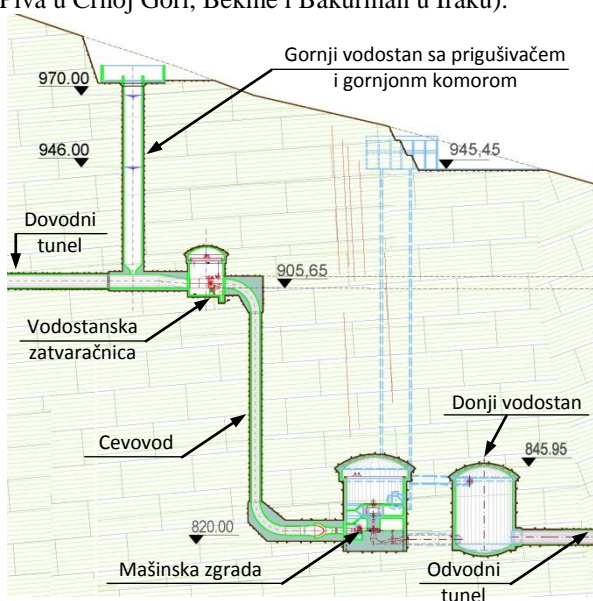
Hidroelektrana „Nevesinje“ poseduje dovodni tunel dužine 4.390 m kružnog poprečnog preseka prečnika 4.50 m i vertikalni čelični cevovod prečnika 3000 mm ukupne dužine 104 m. Pomoću ova dva tunnelska objekta voda se iz uzvodne akumulacije „Zalomka“ dovodi do dva vertikalna Francis agregata montirana u mašinskoj zgradi koja je locirana u rejonu sela Krekavica oko 4,60 km jugozapadno od profila brane „Rilje“ i 140 m ispod površine terena. Reka Zalomka je udaljena 2,60 km od proizvodne hale tako da je spoj sa njom ostvaren dugačkim odvodnim tunelom (2.052 m) i nešto kraćim

odvodnim kanalom (478 m) izvedenim u površinskom iskopu.



Slika 2. Poprečni presek kroz mašinsku zgradu, donji vodostan i odvodni tunel HE Piva

I dok su za potrebe uporedne analize gornji vodostan sa komorom tretirani kao cilindrični objekti, dotle je donji vodostan sagledavan kao pravougaona podzemna konstrukcija imajući u vidu iskustva Projektanta sa sličnim izvedenim ili projektovanim objektima (HE Piva u Crnoj Gori, Bekme i Bakurman u Iraku).



Slika 3. HE „Nevesinje“ – čvorište: gornji vodostan-vodostanska zatvaračnica-cevovod-mašinska zgrada-donji vodostan

## 2. VODOSTANI

Svaki poremećaj izazvan promenom režima rada turbine dovodi do oscilovanja vode u sistemu za dovod (odvod) vode do i od agregata derivacionih hidroelektrana. Kako bi se obezbedila statička i funkcionalna stabilnost

derivacionih hidroelektrana, smanjile oscilacije pritiska kod hidrauličkog udara i poboljšale regulacione karakteristike turbine, projektuju se objekti u vidu rezervoara sa slobodnom površinom u građevinskoj praksi poznatiji kao vodostani. Vodostani smanjuju oscilacije pritiska kod hidrauličkog udara ograničavajući dejstvo udara na deo cevi od turbine do gornjeg vodostana odnosno na sifonski deo odvoda do donjeg vodostana. Takođe gornji vodostani primaju višak vode kod smanjenja opterećenja turbine (zaustavljanje rada agregata, iznenadni ispad sa mreže i dr.) a obezbeđuju je u početnom trenutku, kod naglog povećanja opterećenja (startovanje agregata). Uloga donjih vodostana je obratna.

## 3. PRIMENJENI NUMERIČKI MODEL I GRANIČNI USLOVI

Posmatra se osnovna shema: uzvodno jezero – tunel – gornji vodostan, sa vezom na cevovod pod pritiskom odnosno sistem: donji vodostan – odvodni tunel – nizvodno jezero.

Akumulacija „Zalomka“ predstavlja uzvodno jezero HE „Nevesinje“ koja će se formirati izgradnjom brane od valjanog betona na pregradnom profilu „Rilje“. U prvoj fazi kota normalnog uspora jezera će biti 946 m a u drugoj 970 m. Položaj i dimenzije gornjeg vodostana su odabrane tako da se njime „uhvate“ oscilacije vodnih masa bez izlivanja vode pri zatvaranju turbina i bez uvlačenja vazduha u dovodni tunel pri njihovom startovanju.

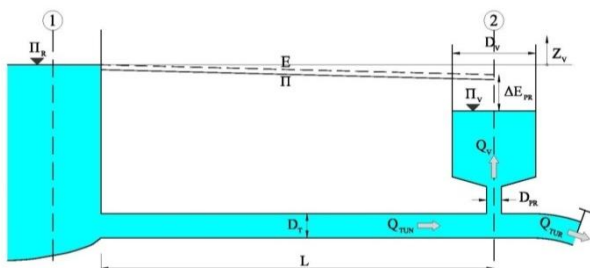
Donje akumulaciono jezero derivacionog sistema HE „Nevesinje“ predstavlja akumulacija „Pošćenje“ čija se izgradnja planira u bliskoj budućnosti sa kotom normalnog uspora 830 m u letnjem periodu godine dok bi se u zimskom periodu akumulacija održavala na koti 836 m. Donji vodostan iz konstruktivnih i izvođačkih razloga mora biti poseban objekat odvojen od mašinske zgrade čije su dimenzije uslovljene visinom oscilacija pri otvaranju i zatvaranju turbina. Pri startovanju agregata ne sme doći do plavljenja montažno-demontažnog prostora za ugradnju i remont sifonskih zatvarača dok se pri zaustavljanju agregata ne sme dozvoliti uvlačenje vazduha u odvodni tunel.

Kod provere funkcionisanja vodostana i za određivanje dimenzija i položaja vodostana, interesantna su dva ekstremna slučaja: naglo zatvaranje predturbinskog zatvarača pri maksimalnom proticaju elektrane ( $Q_{ins} = 2 \times 17.50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i naglo povećanje proticaja kroz turbinu. U svim analizama start proizvodnih agregati obavlja se

u vremenskom periodu od 5 minuta dok vreme zatvaranja zavisi od toga da li je turbinski cevovod snabdeven sa sinhronim ispustom ili ne. U varijanti sa sinhronim ispustom njegov zatvarač se mora zatvoriti u roku od 5 minuta dok je u varijanti bez sinhronog ispusta ispad proizvodnih agregata sa mreže praćen naglim zatvaranjem predturbinskog zatvarača u roku od 5 sekundi.

Zatvaranje predturbinskog zatvarača ili zatvarača na sinhronom ispustu izaziva pozitivnu oscilaciju u gornjem vodostanu i negativnu oscilaciju u donjem, dok je pri startu agregata situacija obrnuta.

Proračun oscilacija vodnih masa kako u gornjem tako i u donjem vodostanu izvršen je korišćenjem numeričkog modela krutog udara čije su jednačine prikazane u nastavku.



Slika 4. Hidraulička shema za proračun oscilacija vodnih masa u gornjem vodostanu

$$\frac{z_{VOD}^{i+1} - z_{VOD}^i}{\Delta t} = \frac{Q_{VOD}^i}{A_{VOD}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{Q_{TUN}^{i+1} - Q_{TUN}^i}{\Delta t} = \frac{g A_{TUN}}{L_{TUN}} \left( Z_{AK} - \frac{z_{VOD}^i + z_{VOD}^{i+1}}{2} - h_{IZG}^i \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_{VOD}^{i+1} = Q_{TUN}^{i+1} - Q_{TUR}^{i+1} \dots\dots\dots (3)$$

$$v_{TUN}^{i+1} = \frac{Q_{TUN}^{i+1}}{A_{TUN}} \dots\dots\dots (4)$$

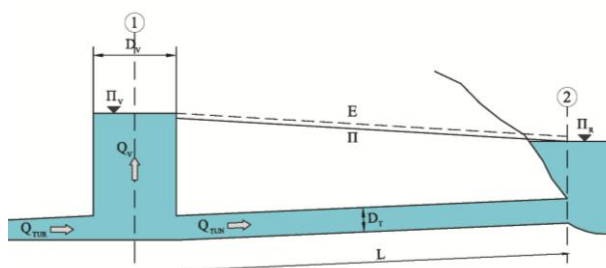
$$h_{IZG,TUN}^{i+1} = \left( \xi_{UL} + \lambda \frac{L_{TUN}}{D_{TUN}} \right) \frac{Q_{TUN}^{i+1} |Q_{TUN}^{i+1}|}{2g A_{TUN}^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$h_{IZG,P}^{i+1} = \frac{Q_{VOD}^{i+1} |Q_{VOD}^{i+1}|}{2g} \left( \frac{1}{A_P^2} - \frac{1}{A_{VOD}^2} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$h_{IZG}^{i+1} = h_{IZG,TUN}^{i+1} + h_{IZG,P}^{i+1} \dots\dots\dots (7)$$

U jednačinama 1-7 oznake imaju sledeća značenja:  $z_{VOD}$  - kota nivoa vode u gornjem vodostanu,  $\Delta t$  - vremenski korak proračuna,  $Q_{VOD}$  - proticaj kroz gornji vodostan,  $A_{VOD}$  – površina poprečnog preseka gornjeg

vodostana,  $Q_{TUN}$  – proticaj kroz dovodni tunel,  $A_{TUN}$  – površina poprečnog preseka dovodnog tunela,  $L_{TUN}$  – dužina dovodnog tunela,  $Z_{AK}$  – kota nivoa vode u uzvodnoj akumulaciji,  $h_{IZG}$  – suma gubitak energije od uzvodnog jezera do vodostana ( $h_{IZG,TUN}$ ) i gubitaka energije na prigušivaču ( $h_{IZG,P}$ ),  $Q_{TUR}$  – proticaj kroz turbinu,  $v_{TUN}$  – brzina vode kroz dovodni tunel,  $\xi_{UL}$  – koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu,  $\lambda \frac{L_{TUN}}{D_{TUN}}$  – koeficijent linijskog gubitka energije na dovodu.



Slika 5. Hidraulička shema za proračun oscilacija vodnih masa u donjem vodostanu

$$\frac{Q_{TUN}^{i+1} - Q_{TUN}^i}{\Delta t} = \frac{g A_{TUN}}{L_{TUN}} \left( \frac{z_{VOD}^i + z_{VOD}^{i+1}}{2} - Z_{AK} - h_{IZG}^i \right) \dots\dots\dots (2')$$

$$h_{IZG,TUN}^{i+1} = \left( \xi_{IZL} + \lambda \frac{L_{TUN}}{D_{TUN}} \right) \frac{Q_{TUN}^{i+1} |Q_{TUN}^{i+1}|}{2g A_{TUN}^2} \dots\dots\dots (5')$$

Jedina razlika između jednačina numeričkog modela krutog udara za proračun oscilacija donjeg vodostana u odnosu na gornji je u jednačinama 2 i 5 gde u jednačini 2 treba obratiti pažnju na položaj nizvodne akumulacije pa time i na raspored članova unutar zgrade dok u jednačini 5 umesto koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu figuriše koeficijent lokalnog gubitka na izlazu.

Najnepovoljnija situacija u eksploataciji koja se može očekivati je ispad oba agregata sa mreže pri punoj uzvodnoj akumulaciji „Zalomka“ u drugoj fazi izgradnje (KNU = 970 mm) u zimskom periodu godine kada se kota u nizvodnom jezeru „Pošćenje“ održava na koti 836 mm. Naglo zatvaranje predturbinskog zatvarača u trajanju od 5 sekundi pri ispadu proizvodnih agregata sa mreže izaziva „pozitivnu“ oscilaciju u gornjem vodostanu i „negativnu“ oscilaciju u donjem vodostanu. Amplituda ovih oscilacija višestruko je veća od onih koje se javljaju u pomenutim objektima pri startovanju agregata kada oni moraju dostići maksimalno opterećenje u periodu od 5 min.

Kako se razmatrane varijante sa i bez sinhronog ispusta u suštini razlikuju u raspoloživom vremenu zatvaranja

zatvarača proizilazi da je u varijanti bez sinhronog ispusta neophodno predvideti gornju komoru gornjeg vodostana i efektivnu površinu donjeg vodostana znatno većih dimenzija nego u varijanti sa sinhronim ispuštom. Sa druge strane treba obratiti pažnju na faznost izgradnje sistema koja ima reperkusije na dimenzije gornjeg vodostana od prigušivača do gornje komore. Naime, želja projektanta je da se prečnik i visina gornjeg vodostana izaberu tako da se u prvoj fazi eksploatacije pomoću njega „uhvati“ pozitivna oscilacija pri ispadu agregata bez nužnosti izgradnje gornje komore koja bi se realizovala u drugoj fazi i služila za prihvatanje oscilujućih vodnih masa u drugoj fazi eksploatacije. To praktično znači da bi se i vodostan realizovao fazno. U prvoj fazi bio bi izgrađen vodostan sa prigušivačem dok bi se gornja komora gradila u narednoj fazi. Prva faza gradnje podrazumeva sistem HE „Nevesinje“ sa kotom normalnog uspora akumulacije „Zalomka“ od 946 mm dok bi u drugoj fazi ova kota trebalo da bude 24.00 m viša.

#### 4. OPIS VARIJANTNIH TEHNIČKIH REŠENJA I PROJEKTI KRITERIJUMI

Kao što je već rečeno razmatraju se dve varijante: varijanta 1 – bez sinhronog ispusta i varijanta 2 sa sinhronim ispuštom na turbinskim vodovima HE Nevesinje. Posmatrano uporedno, u varijanti 1 bez sinhronog ispusta potreban je nešto viši vodostan pri čemu je njegov prečnik i prečnik gornje komore veći kako bi se uhvatila maksimalna pozitivna oscilacija pri naglom zatvaranju predturbinskog zatvarača u obe faze izgradnje. To zahteva pomeranje ose gornjeg vodostana uzvodno usled čega je dovodni tunel oko 10 m kraći a odvodni tunel 10 m duži. Međutim sve to nema presudan uticaj na rezultate proračuna koliko vreme zatvaranja zatvarača pri ispadu proizvodnih agregata sa mreže.

Za dimenzionisanje gornjeg vodostana definisan je kriterijum da se spreči izlivanje vode iz gornje komore vodostana pri zatvaranju agregata i pri najekstremnijim hidrološkim uslovima kada uzvodna brana „Rilje“ prelijeva u drugoj fazi eksploatacije. S obzirom da je brana betonska pri nailasku poplavnog talasa 1000 godišnje velike vode u akumulaciji se formira maksimalan nivo od 972.24 mm.

Prečnik gornjeg vodostana (od prigušivača do gornje komore) određen je tako da se zadovolje sledeći uslovi:

- spreči izlivanje iz vodostana (bez izgrađene gornje komore) u prvoj fazi eksploatacije nakon ispada

proizvodnih agregata sa mreže pri maksimalnim nivoima u uzvodnoj akumulaciji „Zalomka“;

- spreči uvlačenje vazduha u dovodni tunel pri startu agregata i pri apsolutno minimalnom radnom nivou u gornjoj akumulaciji koji iznosi 925 mm.

U okviru narednih tabela uporedno se daju geometrijske karakteristike gornjeg i donjeg vodostana za dve razmatrane varijante sa i bez sinhronog ispusta.

Tabela 1. Karakteristike otvaranja i zatvaranja

|  | Varijanta 1   | Varijanta 2                   |
|--|---------------|-------------------------------|
| Tip zatvarača za manipulaciju pri ispadu agregata sa mreže | Predturbinski | Zatvarač na sinhronom ispuštu |
| Vreme zatvaranja zatvarača pri ispadu agregata sa mreže    | 5 s           | 5 min                         |
| Vreme startovanja agregata                                 | 5 min         | 5 min                         |

Tabela 2. Geometrijske karakteristike gornjeg vodostana

|                       |      | Varijanta 1 | Varijanta 2 |
|-----------------------|------|-------------|-------------|
| Prečnik prigušivača   | (m)  | 1.80        | 1.40        |
| Prečnik vodostana     | (m)  | 6.00        | 4.00        |
| Prečnik gornje komore | (m)  | 20.00       | 14.00       |
| Kota prigušivača      | (mm) | 910.15      | 910.15      |
| Kota gornje komore    | (mm) | 975.00      | 972.00      |
| Visina vodostana      | (m)  | 61.35       | 59.15       |
| Visina gornje komore  | (m)  | 5.00        | 4.60        |

Tabela 3. Geometrijske karakteristike donjeg vodostana

|                  |     | Varijanta 1 | Varijanta 2 |
|------------------|-----|-------------|-------------|
| Širina vodostana | (m) | 20.00       | 15.00       |
| Dužina vodostana | (m) | 14.00       | 9.00        |
| Visina vodostana | (m) | 15.40       | 15.40       |

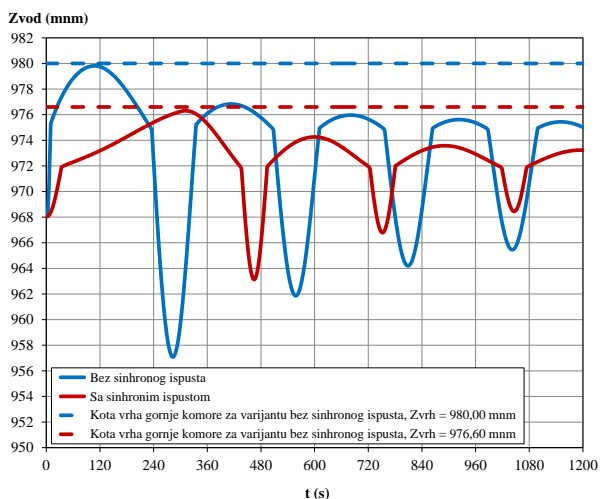
#### 5. REZULTATI PRORAČUNA I NJIHOVA INTERPRETACIJA

Kako bi se odredila kota vrha gornje komore na gornjem vodostanu urađena je simulacija oscilacija pri ispadu oba agregata sa mreže a pri koti normalnog (970

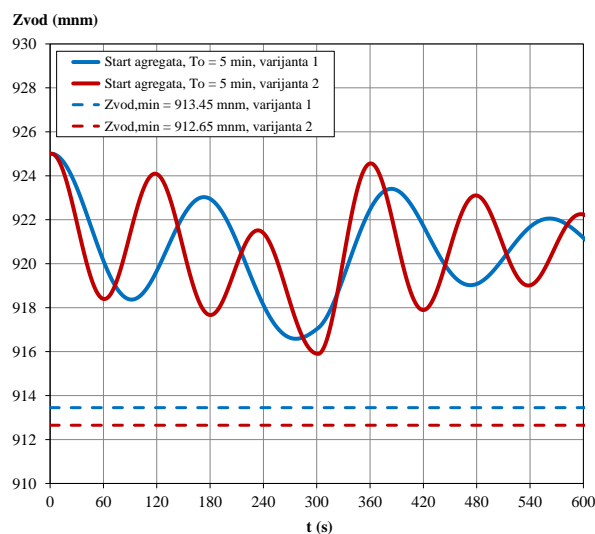
mnm) i maksimalnog uspora (972.24 mnm) u uzvodnoj akumulaciji „Zalomka“. Dobijeni su interesantni rezultati. Površina poprečnog preseka gornje komore je oko 2 puta veća u varijanti bez sinhronog ispusta u odnosu na varijantu kada on figuriše.

Pri određivanju kote vrha gornje komore postavljen je uslov da ova kota mora biti bar 1.00 m viša od maksimalne oscilacije koja se javlja u vodostanu pri ispadu oba agregata sa mreže za slučaj kada je nivo vode u uzvodnoj akumulaciji na koti normalnog uspora (970 mnm). Kada vladaju ekstremni hidrološki uslovi, tj. kada brana „Rilje“ preliiva a desi se ispad oba agregata sa mreže treba obezbediti 20-30 cm slobodnog prostora između kote vrha gornje komore i maksimalne oscilacije vode koja se tom prilikom javlja.

Kota minimalnog radnog nivoa za rad elektrane iznosi 925 mnm pa je simulacija oscilovanja vode u gornjem vodostanu pri startu agregata urađena za slučaj ovako ekstremno niske kote u uzvodnom jezeru. Pokazalo se da je u vodostanu prečnika 6.00 m (varijanta 1) realno očekivati minimalnu kotu vode za oko 3.13 m višu od kote dna vodostana. Sa druge strane u varijanti 2 visina ovog slobodnog prostora iznosi 3.25 m.

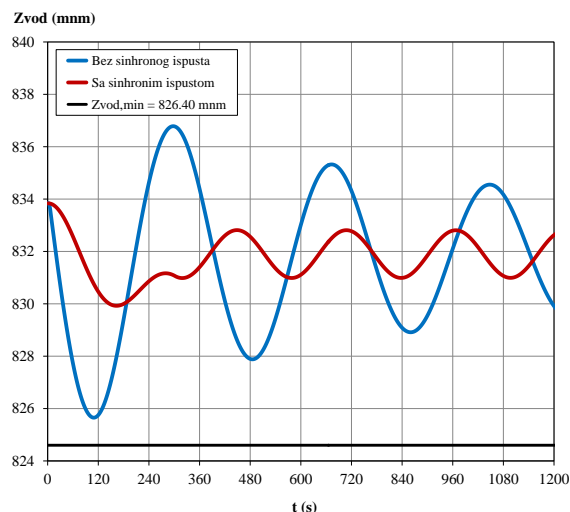


Slika 6. Oscilacije vodnih masa u gornjem vodostanu pri ispadu proizvodnih agregata sa mreže

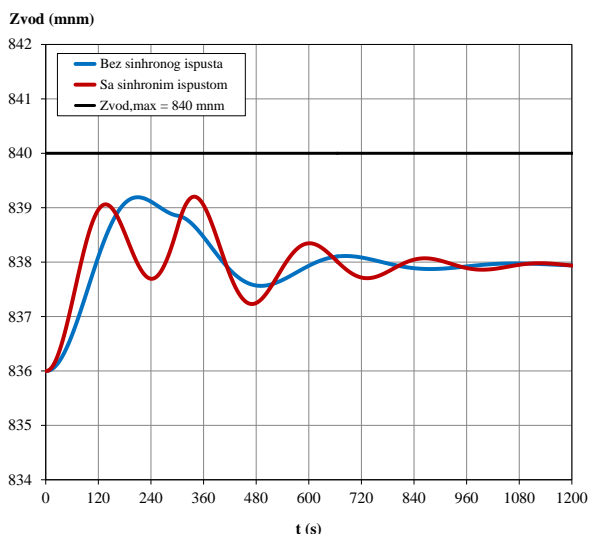


Slika 7. Oscilacije vodnih masa u gornjem vodostanu pri startu proizvodnih agregata

Što se tiče donjeg vodostana za varijantu bez sinhronog ispusta potreban je dvostruko veća površina poprečnog preseka istog u odnosu na varijantu sa sinhronim ispustom. Pri ispadu oba agregata sa mreže minimalna kota nivoa vode u donjem vodostanu mora biti viša za najmanje 1.00 m u odnosu na kotu spoja donjeg vodostana i odvodnog tunela. Pri startovanju agregata maksimalni nivo vode u donjem vodostanu treba da je manji 0.80 m od kote montažno-demontažnog platoa za pristup sifonskim zatvaračima. Želja projektanta je bila da ova kota bude ista za obe razmatrane varijante tj. da donji vodostan u obe varijante bude iste visine.



Slika 8. Oscilacije vodnih masa u donjem vodostanu pri ispadu proizvodnih agregata sa mreže



Slika 9. Oscilacije vodnih masa u donjem vodostanu pri startu proizvodnih agregata

Nizvodni granični uslov za proračun oscilacija vodnih masa u donjem vodostanu pretstavlja kota nivoa vode u donjem akumulacionom jezeru „Pošćenje“. Sa stanovišta zatvaranja pri ispadu agregata sa mreže najnepovoljniji slučaj je kada je kota u jezeru ispod kote vrha izlaza iz odvodnog tunela (831.90 mm). Sa druge strane maksimalni nivoi vode u donjem vodostanu formiraju se pri startovanju agregata u zimskom periodu godine kada se nivo u akumulaciji „Pošćenje“ održava na koti normalnog uspora koja iznosi 836,00 mm.

Tabela 4. Maksimalne kote vode u gornjoj komori pri ispadu oba agregata sa mreže ( $Z_{AK}$  – kota nivoa vode u akumulaciji „Zalomka“,  $Z_{V,MAX}$  – maksimalna kota nivoa vode u gornjoj komori,  $Z_{GK,VRH}$  – kota vraha gornje komore).

|                   | Varijanta 1 |        | Varijanta 2 |        |
|-------------------|-------------|--------|-------------|--------|
| $Z_{AK}$ (mm)     | 970         | 970.24 | 970         | 970.24 |
| $Z_{V,MAX}$ (mm)  | 979.01      | 979.81 | 973,60      | 976.30 |
| $Z_{GK,VRH}$ (mm) | 980         |        | 976.60      |        |

Tabela 5. Minimalne i maksimalne kote vode u donjem vodostanu pri startovanju i zaustavljanju agregata ( $Z_{AK}$  – kota nivoa vode u akumulaciji „Pošćenje“,  $Z_{V,MIN/MAX}$  – minimalna/maksimalna kota nivoa vode u donjem vodostanu)

|                 | Varijanta 1 |           | Varijanta 2 |           |
|-----------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| (mm)            | zatvaranje  | otvaranje | zatvaranje  | otvaranje |
| $Z_{AK}$        | 831.90      | 836       | 831.90      | 836       |
| $Z_{V,MIN/MAX}$ | 825.65      | 839.19    | 829.92      | 839.20    |

## 6. INVESTICIJE VARIJANTNIH REŠENJA

Sagledavanje koštanja objekata za zaštitu od hidrauličkog udara urađeno je na nivou glavnih građevinskih radova (površinski i podzemni iskopi, betonski radovi, armirački radovi) uz poštovanje fazne izgradnje sistema HE Nevesinje. Što se tiče gornjeg vodostana u prvoj fazi gradnje potrebno je realizovati vodostan odgovarajućeg prečnika ali ne i gornju komoru koju je potrebno posedovati u drugoj fazi eksploatacije kada se nadvisi brana „Rilje“ i formira jezero sa višom kotom normalnog uspora 970 mm. Donji vodostan je tretiran u krajnjoj fazi izgrađenosti sistema Gornji Horizonti kada egzistira i nizvodno jezero Pošćenje čija akumulirana voda se energetski prerađuje u hidroelektrani Dabar. Iako se može desiti da sistem HE Nevesinje bude izgrađen pre sistema HE Dabar donji vodostan je poželjno realizovati u prvoj fazi izgradnje.

Tabela 6. Investicije potrebne za izgradnju objekata za zaštitu od hidrauličkog udara (EUR)

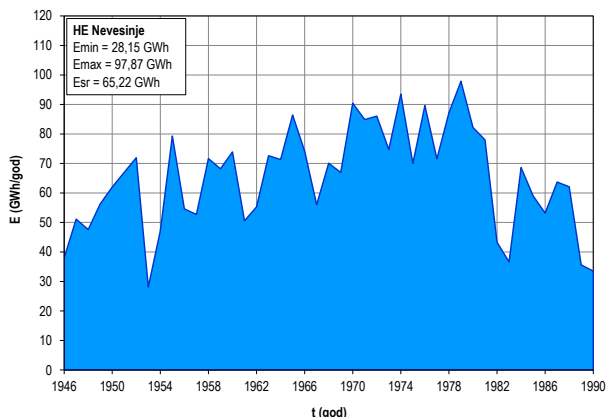
|         |                    | Varijanta 1 | Varijanta 2 |
|---------|--------------------|-------------|-------------|
| I FAZA  | građevinski radovi | 1.640.000   | 800.000     |
|         | HM oprema          | 0           | 160.000     |
| II FAZA | građevinski radovi | 108.000     | 57.000      |
|         | HM oprema          | 0           | 0           |
| UKUPNO  |                    | 1.748.000   | 1.017.000   |

## 6. ENERGETSKA VALORIZACIJA

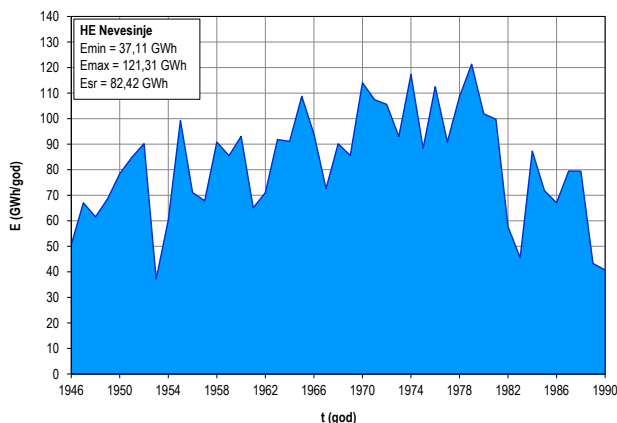
Kao što je već rečeno sistem HE „Nevesinje“ se realizuje dvofazno. U prvoj fazi eksploatacije koja traje 25 godina uzvodna akumulacija „Zalomka“ se realizuje sa branom „Rilje“ koja formira uspor od 946 mm. Tokom drugih 25 godina eksploatacije za energetsku proizvodnju na raspolaganju će biti nadvišena brana „Rilje“ i akumulacija „Zalomka“ sa 24 m višom kotom uspora. Kako bi se sagledali energetski efekti tokom čitavog eksploatacionog perioda potrebno je poznavati moguću srednju višegodišnju proizvodnju HE „Nevesinje“ u prvoj i drugoj fazi eksploatacije.

Proračun energetske proizvodnje urađen je pomoću simulacionog modela „Gornji Horizonti“ kreiran u okviru programskog paketa HEC-ResSim.

U prvoj fazi eksploatacije HE „Nevesinje“ realno je očekivati srednju višegodišnju proizvodnju od 65,22 GWh/god a u drugoj fazi 82,42 GWh/god.



Slika 10. Energetska proizvodnja HE „Nevesinje“ u prvoj fazi eksploatacije



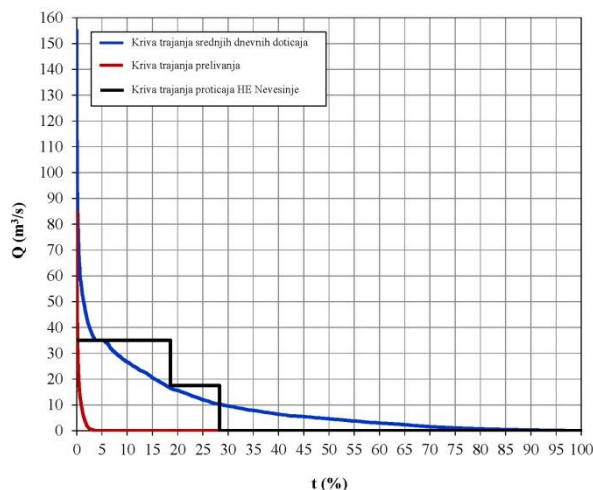
Slika 11. Energetska proizvodnja HE „Nevesinje“ u drugoj fazi eksploatacije

Varijanta sa sinhronim ispustom ima pored pozitivnih energetskih efekata i negativne energetske efekte koji se ogledaju u gubitku proizvodnje pri svakom zatvaranju turbina u sklopu HE „Nevesinje“. Naime da bi se obezbedile manje oscilacije u gornjem i donjem vodostanu neophodno je predvideti sinhroni ispust sa pripadajućim zatvaračem za svaki od agregata kroz koji se ispušta voda pri bilo kom prekidu rada istih. Zatvaranje zatvarača na sinhronom ispustu ne mora biti naglo, već postepeno (u ovom slučaju 5 min) što višestruko smanjuje oscilacije vode u vodostanima ali i proizvodi gubitke u energetske proizvodnji. Kako bi se odredila izgubljena energija potrebno je poznavati mogući broj zaustavljanja agregata tokom jedne godine.

Akumulacija „Zalomka“ je najuzvodnija u sistemu Gornji horizonti a pripadajuća elektrana „Nevesinje“ radi vršno sa 2 pika tokom dana pokrivajući periode sa

najvećim opterećenjem. Pored prirodnih voda reke Zalomke ( $Q_{sr} = 4,30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ka pregradnom profilu brane „Rilje“ gravitira i prevedena količina vode iz gatačkog polja ( $Q_{sr} \approx 5,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ) koja se u akumulaciju „Zalomka“ transportuje sistemom za dovod vode Srđevići – Dobro polje. Ovaj sistem je dugačak oko 5700 m od kojih je 4200 m kanalskog tipa a 1500 m čine tuneli kojima se skraćuje trasa na deonicama sa nepovoljnim topografskim uslovima.

Analize na nivou optimizacija su pokazale da je elektrana u pogonu oko 6 h/dan. Ako se uz to zna da elektrana radi vršno sa dva pika tj. da su moguća dva zaustavljanja agregata dnevno, ukupan očekivani broj zaustavljanja je  $N_z = 2 \times 365 = 730$ . Ovako dobijeni godišnji broj zaustavljanja agregata je moguć ali je ekstremno i najnepovoljniji za varijantu sa sinhronim ispustom s obzirom da bi gubici energije u tom slučaju bili maksimalni.

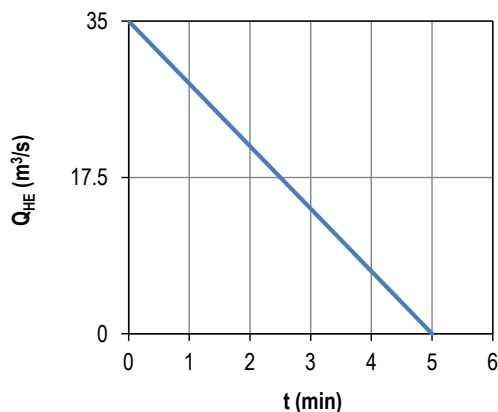


Slika 12. Akumulacija „Zalomka“ i HE „Nevesinje“ – kriva trajanja proticaja

Ako se pogleda kriva trajanja dotoka u akumulaciju Zalomka (priradne i prevedene gatačke vode) i kriva trajanja proticaja HE Nevesinje vidi se da je elektrana u pogonu oko 28 % vremena od čega 3 % vremena elektrana radi sa punom instalacijom 24 h/dan bez zaustavljanja tokom dana. Dakle oko 25 % vremena elektrana radi sa dva zaustavljanja što je oko 100 dana tokom godine. Sa ovako niskim brojem zaustavljanja tokom godine ( $N_z = 2 \times 100 = 200$ ) favorizovala bi se varijanta sa sinhronim ispustom.

Kako se ne bi favorizovala ni jedna od razmatranih varijanti projektant je u dalje analize ušao sa brojem od 440 zaustavljanja agregata tokom godine.





Slika 13. Dijagram zaustavljanja agregata

Ako se pogleda dijagram zaustavljanja agregata lako se dolazi do zapremine vode koja se za vremenski period od 5 min propusti kroz sinhroni ispust.

$$V = \frac{35 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 300\text{s}}{2} = 5250 \text{ m}^3$$

Energija koja se tom prilikom izgubi izračunava se na sledeći način:

$$\Delta E_{\text{IZG}} = \rho g Q_{\text{HE}} H_{\text{NETO}} \eta \Delta t$$

gde je  $Q_{\text{HE}}$  – prosečan proticaj kroz elektranu (17,50 m<sup>3</sup>/s) u periodu zaustavljanja agregata (5 min) a  $H_{\text{NETO}}$  – prosečan neto pad. Prosečna kota u uzvodnoj akumulaciji Zalomka u prvoj fazi eksploatacije je oko 945 mm a u drugoj 968,50 mm dok je za nizvodnu akumulaciju Pošćenje usvojena prosečna kota 832 mm. Gubici energije na dovodu od uzvodne akumulacije Zalomka do agregata u mašinskoj zgradi HE Nevesinje za prosečan proticaj tokom vremena zaustavljanja iznose 2,00 m. Imajući sve ovo u vidu sračunati su prosečni godišnji gubici u proizvodnji za obe faze eksploatacije:

$$\text{I FAZA: } E_{\text{IZG}} = 440 \times [1000 \times 9,81 \times 17,50 \times (945 - 832 - 2) \times 0,87 \times 5 / 60 / 1000] = 607.884 \text{ kWh}$$

$$\text{II FAZA: } E_{\text{IZG}} = 440 \times [1000 \times 9,81 \times 17,50 \times (968,50 - 832 - 2) \times 0,87 \times 5 / 60 / 1000] = 736.580 \text{ kWh}$$

## 7. EKONOMSKE ANALIZE

Investicije i energetske efekti (pozitivni i negativni) predstavljaju ulazne podatke analize koja je sprovedena primenom dinamičke metode (diskontovanje), a rezultati su iskazani preko pokazatelja (dinamic unit costs) ekonomske cene, za diskontne stope u rasponu od 4% do 8% i period eksploatacije koji odgovara ekonomskom veku objekta (50 godina). Ovde bi trebalo

naglasiti da se dobijene ekonomske cene odnose samo na deo troškova vezanih za objekat vodostana pa tako predstavljaju samo deo ukupne ekonomske cene na pragu HE Nevesinje.

Razmatrane varijante se međusobno razlikuju:

- u pogledu investicionih troškova u periodu izgradnje (Varijanta 1 je skuplja za 0,73 miliona €)
- eksploacionih troškova sračunatih na bazi iskustvenih normativa u periodu eksploatacije, zamene HM opreme (zatvarača) nakon 30 godina eksploatacije
- u pogledu ostvarene prosečne godišnje proizvodnje.

Naime, od ukupne prosečne godišnje proizvodnje za Varijantu 1 od 65,22 GWh za prvu fazu realizacije projekta za Varijantu 2 (sa sinhronim ispustom) prosečno godišnje se gubi 0,61 GWh električne energije, odnosno nakon realizacije druge faze od ukupne prosečne godišnje proizvodnje za Varijantu 1 od 82,42 GWh za Varijantu 2 se javljaju gubici električne energije u visini od 0,74 GWh godišnje.

Posmatrano samo sa troškovnog aspekta, Varijanta 2 sa sinhronim ispustom je neznatno povoljnija (niži investicioni količnik i ekonomska cena vodostana) u odnosu na Varijantu 1.

Međutim, imajući u vidu da bi izbor Varijante 2 značio trajni gubitak moguće proizvodnje u visini od 0,61 GWh električne energije prosečno godišnje prvih 25 godina eksploatacije a zatim 0,74 GWh godišnje do kraja ekonomskog veka projekta, a što daje ukupan gubitak od 33,61 GWh za 50 godina eksploatacije, u analizu je uključen gubitak prihoda koji se po tom osnovu ostvaruje a koji je valorizovan po prodajnim cenama u rasponu od 4 €/KWh do 8 €/KWh.

Rezultati ekonomske analize pokazuju da predlog optimalne varijante zavisi kako od visine prodajne cene tako i od cene kapitala (diskontna stopa). Tako za cenu kapitala od 4 % i prodajne cene iznad 6,00 €/KWh rezultati postaju nešto povoljniji za Varijantu 1 bez sinhronog ispusta. Pri ceni kapitala od 6 % i pri prodajnoj ceni iznad 7,97 €/KWh, odnosno pri ceni kapitala od 8 % i pri prodajnim cenama el. energije iznad 10,11 €/KWh ostvaruju se povoljniji rezultati za Varijantu 1 bez sinhronog ispusta. U svim ostalim slučajevima je niža ekonomska cena za varijantu 2 sa sinhronim ispustom.

Tabela 7. Ekonomska cena vodostana (€/kWh) za različite vrednosti diskontnih stopa i cena el.energije

|                                       | Varijanta 1         | Varijanta 2 |
|---------------------------------------|---------------------|-------------|
| Gubitak en.proizvodnje valorizovan sa | Diskontna stopa 8 % |             |
| 4 €/kWh                               | 0.238               | 0.181       |
| 6 €/kWh                               |                     | 0.200       |
| 7 €/kWh                               |                     | 0.209       |
| 8 €/kWh                               |                     | 0.218       |
| Gubitak en.proizvodnje valorizovan sa | Diskontna stopa 6 % |             |
| 4 €/kWh                               | 0.191               | 0.154       |
| 6 €/kWh                               |                     | 0.173       |
| 7 €/kWh                               |                     | 0.182       |
| 8 €/kWh                               |                     | 0.191       |
| Gubitak en.proizvodnje valorizovan sa | Diskontna stopa 4 % |             |
| 4 €/kWh                               | 0.148               | 0.129       |
| 6 €/kWh                               |                     | 0.148       |
| 7 €/kWh                               |                     | 0.157       |
| 8 €/kWh                               |                     | 0.166       |

Na osnovu svega prethodno iznetog projektant se opredelio za varijantu 1 bez sinhronog ispusta tj. za tehničko rešenje u koje na startu treba uložiti oko 730.000 € više, ne toliko iz razloga povoljnijih ekonomskih pokazatelja već zbog toga što se ovakvim rešenjem izbegavaju konstantni gubici u proizvodnji tokom eksploatacije ali i složeniji sistem manevrisanja sa mašinskom i hidromehaničkom opremom pri svakom zaustavljanju agregata. Takođe, ne treba zaboraviti da sinhroni ispušt može da otkáže tj. da npr. ne dođe do otvaranja zatvarača na njemu u trenutku ispada sa mreže što bi imalo veoma loše posledice sa stanovišta oscilovanja vodnih masa u gornjem i donjem vodostanu. Voda bi se iz gornjeg vodostana izlila bez mogućnosti njenog kontrolisanog sprovođenja dok bi u odvodnom tunelu neminovno došlo do uvlačenja vazduha. Derivaciono postrojenje HE „Nevesinje“ bez sinhronog ispusta predstavlja pouzdaniji sistem kod kojeg su rizici svedeni na najmanju moguću meru a reakcija sistema na nepredviđene događaje nije povezana sa ljudskim faktorom niti sa bilo kojim vidom automatizovanih radnji koje iz različitih razloga mogu da zakažu.

## 8. ZAKLJUČCI

Polazno tehničko rešenje sa pravougaonim poprečnim presekom mašinske zgrade i donjeg vodostana rezultat je iskustava projektanta sa sličnim izvedenim ili

projektovanim podzemnim objektima (HE Piva u Crnoj Gori, Bekme i Bakurman u Iraku).

Nakon interpretacije apsolutno registrovanih vrednosti u do sada izvedenim bušotinama na trasi derivacije ustanovljeno je da se u zoni mašinske zgrade i donjeg vodostana može očekivati maksimalni nivo podzemne vode koji je oko 70 m viši od dna pomenutih podzemnih konstrukcija. Kako bi se obezbedila sveobuhvatna stabilnost ovih objekata pokušalo se da se sa sistemom drenažnih galerija i drenažnih bušotina oko objekata snizi nivo podzemnih voda a sa takvim novim podatkom odrede dimenzije obloga, raspored i dužina ankeri. Nedostaci ovakvog tehničkog rešenja su dvojaki: 1) povećanje investicija usled neophodnosti izvođenja prstenastog sistema drenažnih galerija i drenažnih bušotina i 2) nemogućnost egzaktnog i pouzdanog sagledavanja efikasnosti ovakvog sistema u snižavanju nivoa podzemnih voda.

Imajući u vidu nepovoljne uslove u podzemlju projektni tim je napustio inicijalno rešenje mašinske zgrade i donjeg vodostana pravougaonih poprečnih preseka i prešao na cilindrične konstrukcije koje su se pokazale višestruko efikasnije u borbi protiv nepovoljnih uticaja podzemnih voda. Sistem drenažnih galerija više nije bio neophodan, betonske obloge su postale tanje, ankeri kraći što je smanjilo ukupne investicije ovih objekata u celini. Potrebna površina donjeg vodostana za zaštitu odvodnog tunela od hidrauličkog udara je 280 m<sup>2</sup> (B x L = 20 x 14) tako da odgovarajući ekvivalentni prečnik kružnog poprečnog preseka iznosi 19.00 m što je ujedno i prečnik cilindrične podzemne mašinske zgrade.

Uopredna tehno-ekonomska analiza dva tehnička rešenja objekata za zaštitu od hidrauličkog udara na derivacionom postrojenju HE „Nevesinje“ za cilj je imala sveobuhvatno sagledavanje prednosti i mana sistema sa i bez sinhronog ispusta. Iako ekonomske analize nisu egzaktno pokazale apsolutnu prednost jedne varijante u odnosu na drugu, proces odlučivanja je okončan kada su u razmatranje uzeti svi nepovoljni efekti prisustva sinhronog ispusta tokom procesa eksploatacije a prevashodno mogućnost njegovog otkaza. Iako se niti jedan rezultat u građevinskoj struci ne može generalizovati, čini se da je sistem bez sinhronog ispusta višestruko pouzdaniji pa je kao takav pogodniji za predlaganje u procesu projektovanja na derivacionim hidroenergetskim postrojenjima kakav je HE „Nevesinje“.

## LITERATURA

- [1] Ivetić, M. (1996): Računska hidraulika, Tečenje u cevima
- [2] Đorđević, B. (2001): Hidroenergetsko korišćenje voda
- [3] Đorđević, B. (1981-1984): Korišćenje vodnih snaga I i II
- [4] Đorđević, B. (1989): Objekti hidroelektrana
- [5] Souza O.H., Barbieri N., Santos A.H.M. (1999), Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 1269-1272
- [6] Xiaodong Yu, Jian Zhang, Ling Zhou, Hydraulic Transients in the Long Diversion-Type Hydropower Station with a Complex Differential Surge Tank, Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 241868
- [7] Škifić J, Radošević A, Brajković Đ, Družeta S, Čavrak M, (2013) Numerical simulations of hydraulic transients in hydropower plant Jajce II, Engineering Review Vol. 33, Iss.1, 51-56
- [8] Vítkovský J.; Bergant A.; Simpson A., Martin F. Lambert M. (2006), Systematic Evaluation of One-Dimensional Unsteady Friction Models in Simple Pipelines, Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 132, 7, 696-708

ANALYSIS OF TRANSIENT REGIMES  
AT DIVERSION-TYPE HYDRO POWER PLANT (HPP) “NEVESINJE”

by

Dalibor DRAŠKOVIĆ<sup>1)</sup>, Radmilo GLIŠIĆ<sup>1)</sup>, Branislav KOLAREVIĆ,  
Milena LUČIĆ<sup>1)</sup>, Marina DIMKIĆ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd,

Summary

“Upper Horizons” (“Gornji Horizonti”) is a name of one of the most complex water-management and hydro-power systems in the area of former Yugoslavia, for which the designing and construction processes last for more than 40 years. This system is located in the south-east part of Bosnia and Herzegovina and it comprises four (4) karst fields, which descend step-like towards the Adriatic Sea. These karst fields are: Gatačko Polje, Nevesinjsko Polje, Dabarsko Polje and Fatničko Polje karst fields.

A part of the hydro-system called “Upper Horizons” comprises, in its final stage, utilization of water resources on the direction: Gatačko Polje field - the Zalomka River - Nevesinjsko Polje field - Dabarsko Polje field - Fatničko Polje field - Bileća reservoir. All water resources within this system, that are conveyed to Bileća reservoir basin, can be used for energy generation on further 400 m head all the way to the sea, at already constructed Hydro Power Plants: HPP Trebinje I, HPP Trebinje II, HPP Dubrovnik and PSP Čapljina, which were successively included into operation, starting from

1965 - HPP Dubrovnik, 1968 - HPP Trebinje I, 1979 - PSP Čapljina, till 1981 - HPP Trebinje II.

“Nevesinje” water-management and hydro-power facility comprises: the dam at “Rilje” dam site section -which is located at about 23 km east of Nevesinje; the reservoir on the Zalomica River; the diversion-type Hydro Power Plant “Nevesinje” and the water conveyance system intended for transferring of water from watershed of the Mušnica River (Gatačko Polje field) and into the watershed of the Zalomka River (Nevesinjsko Polje field). Main roles of the mentioned reservoir are: reduction of floods at Nevesinjsko Polje field; provision of supply of the required quantities of water to population and industry in the surrounding areas; enabling of irrigation of the karst fields in the eastern Herzegovina and effecting of the maximum possible electric power generation at its own diversion-type Hydro Power Plant, as well as at the downstream Hydro Power Plants, planned to be constructed in future.

In the design documents of different levels of designing, prepared by different designers, HPP Nevesinje has

always existed as a diversion-type Hydro Power Plant with an underground powerhouse. According to the Basic Design prepared in 1976, HPP “Nevesinje” was envisaged as the Pump Storage Power Plant, in which, for energy generation, the generating units used water from the Zalomka River, stored in the reservoir with the normal water level elevation of 966 masl. According to the Preliminary Design for HPP “Nevesinje” (Energoinvest, Sarajevo, 1985), the Pump Storage Power Plant “Nevesinje” was re-designed into the conventional Hydro Power Plant, at which water level elevation was raised from 966 masl to 970 masl.

The diversion-type HPP “Nevesinje” consists of the following structures: inlet structure, headrace tunnel, upper surge tank, surge tank valve chamber, vertical penstock, underground powerhouse, lower surge tank, tailrace tunnel and tailrace channel.

The diversion-type HPPs with underground powerhouse possess shorter or longer tailrace tunnel, which connects turbine water passage and the downstream riverbed. This is not the case with the diversion-type HPPs with the aboveground powerhouse. Having in mind that through the headrace tunnel the water is transported to the underground powerhouse and through the tailrace tunnel, the water is transported to the downstream riverbed, it is necessary to foresee the structures which protect both tunnels against water hammer. Whereas the upper surge tank (which also appears at the diversion-type HPPs with the aboveground powerhouse) is most frequently designed for the headrace tunnel, for the tailrace tunnel is necessary to foresee the lower surge tank, located immediately downstream of the powerhouse.

The main analysed issue was whether by installation of the synchronous outlets at the generating units within the powerhouse of HPP “Nevesinje”, the dimensions and thereby the investments required for construction of the upper and lower surge tank can be reduced to the extent that losses of energy, which are inevitable during each disconnection of the generating unit (either planned or sudden), can be justified. Namely, during load rejection, the turbine inlet valve closes suddenly and the water, which was passing through the turbine, is discharged through the synchronous outlet with the regulating valve. Closing time of the regulating valve at the synchronous outlet is a period during which the water which was not used for energy generation, is discharged into the tailrace tunnel and water masses oscillations within the upper and

lower surge tank are reduced, in relation to the variant technical solution which does not imply installation of the synchronous outlet.

Two variant solutions have been analysed: Variant 1 - without the synchronous outlet and the Variant 2 - with the synchronous outlet at the turbine penstock of the HPP “Nevesinje”. If we compare these variant solutions, in the Variant 1 (without the synchronous outlet), the structures intended for protection against water hammer have larger dimensions in relation to the Variant 2 (which implies installation of the synchronous outlet). This means that Variant 1 is characterized by: higher initial investments into the structures, absence of losses in the production and minimization of the automatized operations, which might fail for different reasons.

The analysed variant solutions for the diversion-type HPP “Nevesinje” mutually differ - both in terms of the investment costs during the period of construction and operation, as well as in terms of the realized average annual production.

After performing a comparative techno-economic analysis, the Designer’s team has decided for the Variant 1 - without the synchronous outlet, i.e. for the technical solution in which higher investments should be made at the beginning, not only because of more favourable economic indicators, but because, by this solution, the constant production losses during operation shall be avoided and also because the complex system for handling of the mechanical and hydro-mechanical equipment during each shut-down of the generating unit, shall be avoided too. It also shouldn’t be forgotten that the synchronous outlet might fail, i.e. for example the regulating valve installed on the synchronous outlet can fail to open at the moment of load rejection, which would result in very negative consequences - in terms of fluctuation of water masses within the upper and lower surge tank. The diversion type HPP “Nevesinje”, without the synchronous outlet, represents more reliable system in which the risks are reduced to the lowest possible extent and reaction of the system to unforeseeable events is not linked to human factor or to any type of automatized operations which might fail for different reasons.

Key words: “Upper Horizons” (“Gornji Horizonti”) of the hydrosystem on the Trebišnjica River, diversion-type Hydro Power Plant, HPP “Nevesinje”, structures for protection against water hammer, synchronous outlet.

Redigovano 13.10.2017.