

PRIHVATANJE NESTACIONARNIH FENOMENA (HIDRAULIČKOG UDARA) U DERIVACIJI POD PRITISKOM

Pri nagloj promeni brzine vode u derivaciji pod pritiskom dolazi do povišenja ili sniženja pritiska, što se naziva hidrauličkim udarom. S obzirom da se, pored havarijskih situacija, hidraulički udar javlja u normalnim uslovima rada, pri tzv. prelaznim režimima rada HE: puštanje u pogon, zaustavljanje ili promena snage (odnosno protoka) sa kojom postrojenje radi, neophodno je sagledati veličinu udara i, ukoliko je to potrebno, predvideti mere za njegovo smanjenje. U hidroenergetskim sistemima primenjuju se sledeće hidrauličke i konstruktivne mere:

- ugrađivanje vodostana,
- ugrađivanje sinhronog regulatora pritiska,
- skraćivanje dužine cevovoda, ako u sistemu postoji vodostan,
- povećavanje vremena manevra (puštanja u pogon i zaustavljanja agregata),
- izbor najpogodnijeg režima manevra.

Za preliminarno sagledavanje potrebe uvođenja u sistem vodostana ili sinhronog regulatora pritiska, koristi se konstanta inercije derivacije pod pritiskom (T_i), pogledati knjigu Korišćenje vodnih snaga – objekti hidroelektrana (*Dorđević, 1989*).

Hidroenergetski sistemi koji se rade u okviru elaborata zahtevaju izgradnju vodostana, kao meru za prihvatanje nestacionarnih fenomena.

DIMENZIONISANJE VODOSTANA

Vodostani su objekti kojima se derivacija pod pritiskom štiti od hidrauličkog udara. Svoju funkciju vodostan obavlja tako što vodenom masom odbija udarni talas, čime skraćuje dužinu puta propagacije (sprečava prostiranje talasa u tunel), smanjuje najveću vrednost udara u cevovodu i smanjuje nepovoljne oscilacije pritiska na turbinu pri prelaznim režimima.

Pod dimenzionisanjem vodostana podrazumeva se rešavanje dva osnovna problema:

- A) problem stabilizacije oscilacija i
- B) problem maksimalnih amplituda.

A) Problem stabilizacije oscilacija

Problem stabilizacije oscilacija podrazumeva određivanje minimalne površine poprečnog preseka vodostana pri kojoj će doći do prigušenja oscilacija u vodostanu. Da bi se ovo ostvarilo neophodno je da budu ispunjena sledeća dva kriterijuma:

- 1) Površina poprečnog preseka vodostana (F_V) ne sme da bude manja od neke kritične vrednosti F_{kr} (tzv. Tomin kriterijum):

$$F_V > F_{kr} = \frac{L \cdot Q_0^2}{2g \cdot f_T \cdot \Delta h_T (H_0 - \Delta h_T - 3\Delta h_C)}$$

gde su: L - dužina derivacije, Q_0 - maksimalan protok kroz derivaciju koji odgovara instalisanom protoku (Q_{inst}), H_0 - maksimalni bruto pad, f_T - površina poprečnog preseka dovodne derivacije (tunela), Δh_T i Δh_C - gubici energije u tunelu i cevovodu.

Površina poprečnog preseka vodostana obično se usvaja za 10 - 15 % veća od kritične vrednosti:

$$F_V = (1,1 \div 1,15) F_{kr}$$

Na osnovu dobijene vrednosti površine poprečnog preseka vodostana određuje se prečnik vodostana (D_V). Dobijenu vrednost treba zaokružiti na bliži decimetar.

2) Drugi uslov stabilizacije oscilacija u vodostanu odnosi se na sumu gubitaka pada u tunelu i cevovodu pri maksimalnom protoku, koja treba da bude manja od $1/3$ statičkog pada:

$$\Delta h_T + \Delta h_C < \frac{1}{3} H_0$$

Ovaj uslov je uglavnom zadovoljen.

Proračun maksimalne amplitude oscilovanja u vodostanu bez trenja

Kota kalote vodostana određuje se na osnovu maksimalnog povećanja nivoa bez trenja u odnosu na statički nivo u vodostanu, što je teorijski slučaj. Ta vrednost određuje se na osnovu izraza:

$$Z_* = v_0 \sqrt{\frac{L_T \cdot f_T}{g \cdot F_V}}$$

gde je od novih oznaka v_0 – brzina vode u tunelu pri instalisanom protoku kroz tunel.

Pošto je prilikom trasiranja derivacije kota kalote vodostana (KKV) već određena kao vrednost za 20 m iznad KNU, vrednost Z_* ne može biti veća od 20 m. U slučaju kada to nije zadovoljeno potrebno je povećati prečnik vodostana da bi se uslov zadovoljio.

Prema tome, u slučaju kada je:

$Z_* > 20$ m potrebno je pretpostaviti $Z_* = 20$ m iz tog uslova odrediti F_V , a zatim i novi prečnik vodostana D_V i dobijenu vrednost zaokružiti na veći decimetar. Na taj način dobijen je stvarni prečnik vodostana, kojim se ulazi u dalje proračune.

B) Problem maksimalnih amplituda

Problem maksimalnih amplituda je drugi problem koji se mora rešiti pri dimenzionisanju vodostana. U tom smislu razmatraju se dva kritična slučaja: pojava maksimalne gornje oscilacije, kada je nivo u jezeru na koti normalnog uspora i pojava maksimalne donje oscilacije, kada je voda u jezeru na minimalnom radnom nivou.

I) Maksimalna gornja oscilacija javlja se pri trenutnom potpunom rasterećenju, odnosno kada se protok kroz turbinu (i derivaciju) sa maksimalnog protoka Q_0 trenutno zaustavi ($Q_0 \rightarrow 0$).

Maksimalne oscilacije za ovaj slučaj mogu se odrediti sa dijagrama zavisnosti relativne maksimalne oscilacije (Z_{\max}/Z_*) u funkciji relativne veličine gubitaka na dovodu ($p = \Delta h_T/Z_*$). Ovi dijagrami dati su u prilogima 1 i 2.

$$p = \frac{\Delta h_T}{Z_*} \Rightarrow (\text{prilog 1 ili 2}) \Rightarrow \frac{Z_{\max}}{Z_*} \Rightarrow Z_{\max}$$

Iz priloga 1 moguće je odrediti prve tri oscilacije: $Z_{1\max}, Z_{1\min}, Z_{2\max}$

II) Maksimalna donja oscilacija javlja se pri trenutnom potpunom opterećenju (otvaranju), odnosno kada se protok kroz turbinu (i derivaciju) trenutno poveća na maksimalan protok Q_0 ($0 \rightarrow Q_0$). I to je namerno uvedena pesimistička pretpostavka, radi sigurnosti odluka o dispoziciji dovodne derivacije.

Ova veličina značajna je da bi se sagledala mogućnost pojave uvlačenja vazduha u cevovod. To se ne sme dozvoliti, pa je u takvim slučajevima neophodno predvideti neku meru zaštite: povećavanje nagiba tunela, ugrađivanje prigušivača, formiranje donje komore i sl.

Maksimalna donja oscilacija može se odrediti sa dijagrama zavisnosti relativne maksimalne donje oscilacije (Z_{min}/Z_*) u zavisnosti od relativne veličine gubitaka na dovodu ($p=\Delta h_T/Z_*$). Ovi dijagrami dati su u priložima 1 i 3.

$$p = \frac{\Delta h_T}{Z_*} \Rightarrow (\text{prilog 1 ili 3}) \Rightarrow \frac{Z_{min}}{Z_*} \Rightarrow Z_{min}$$

Kota do koje će se spustiti voda pri trenutnom potpunom opterećenju iznosi:

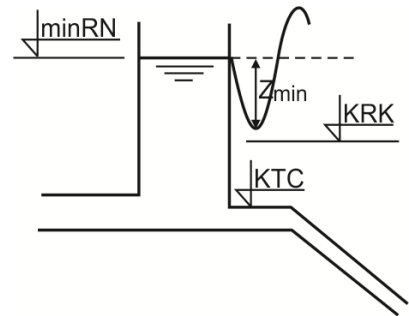
$$\text{minRN} - Z_{min}$$

Ova vrednost se upoređuje sa kritičnom kotom za uvlačenje vazduha u cev (KRK) koja iznosi:

$$\text{KRK} = \text{KTC} + 3 \frac{v_C^2}{2g}$$

gde je KTC - kota temena cevovoda (videti skicu):

$$\text{KTC} = \text{KOUT} - L_T \cdot i - D_T/2 + D_C$$



U slučajevima kada je $\text{KRK} > \text{minRN} - Z_{min}$ došlo bi do uvlačenja vazduha u cevovod, pa je potrebno preduzeti neku meru u cilju sprečavanja te pojave.

$$\text{KRK} > \text{minRN} - Z_{min} \Rightarrow \text{potrebno preduzeti neku meru kako bi se sprečilo uvlačenje vazduha u cevovod}$$

Za to postoji više mogućnosti: povećavanje nagiba tunela, ugrađivanjem prigušenja na ulazu u vodostan, izgradnja donje komore.

1. Povećanje nagiba tunela

Jedna od mogućnosti je povećavanje nagiba tunela (sa nagiba $i=0,3\%$ na neki vići nagib i' , pri čemu se kao maksimalna vrednost okvirno usvaja $i_{max}=1\%$), što utiče na spuštanje KTC, pa i KRK. Nagib tunela kojim bi se zadovoljio uslov neuvlačenja vazduha iznosi:

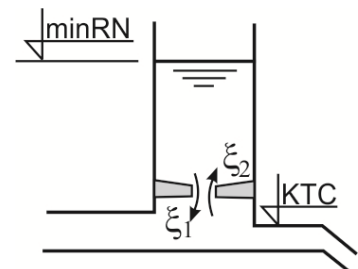
$$\text{KTC} + 3 \frac{v_C^2}{2g} = \text{minRN} - Z_{min} \Rightarrow \text{KOUT} - L_T \cdot i' - D_T/2 + D_C + 3 \frac{v_C^2}{2g} = \text{minRN} - Z_{min}$$

$$\Rightarrow i' \Rightarrow \text{usvojiti } i' \text{ na veći promil} \Rightarrow \text{odrediti nove vrednosti KTC i KRK}$$

2. Vodostan sa prigušenjem

Drugi način sprečavanja uvlačenja vazduha u cevovod je prigušenje oscilacija, koje se postiže ugrađivanjem prigušenja (suženja) na ulazu u vodostan. Na ovaj način se prigušuju (smanjuju) amplitude i donjih i gornjih oscilacija.

Stepen smanjenja amplitude zavisi od stepena prigušenja, pri čemu treba imati na umu da veći stepeni prigušenja mogu prouzrokovati veći pritisak u bazi vodostana, odnosno prenošenje dela udarnog pritiska u tunel. Optimalna vrednost prigušenja rezultat je



optimizacionih analiza, koje se baziraju na analizi koštanja dovodne derivacije i vodostana. Nomogrami za određivanje maksimalnih oscilacija u vodostanu sa prigušenjem dati su u prilogima 4 i 5. Raditi za vrednost optimalnog prigušenja (isprekidana linija c-c). Odrediti i gornje i donje oscilacije.

3. Vodostan sa donjom komorom

Još jedan čest način sprečavanja uvlačenja vazduha u cevovod je predviđanje (izgradnja) donje komore. Donja komora se formira ispod najnižeg dinamičkog nivoa vode u vodostanu. U opštem slučaju, neophodna zapremina donje komore pri odsustvu trenja (W_0) određuje se iz relacije:

$$W_0 = \frac{L \cdot f_T \cdot v_k^2}{2 \cdot g \cdot \Delta h_{Tk}}$$

Stvarna zapremina donje komore (sa trenjem) određuje se kao funkcija:

$$W_{dk} = F(W_0, x_n, m)$$

gde je (videti skicu):

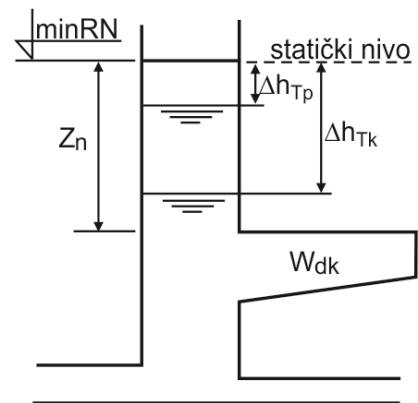
$$x_n = \frac{Z_n}{\Delta h_{Tk}}$$

Z_n - rastojanje gornjeg svoda komore od statičkog nivoa (minRN)

Δh_{Tk} - gubici nakon opterećenja (u krajnjoj fazi)

v_k - brzina vode nakon opterećenja (u krajnjoj fazi)

$m = \frac{Q_p}{Q_k}$ - odnos protoka u početnom (Q_p) i krajnjem (Q_k) trenutku



Dijagram odnosa W_{dk}/W_0 u funkciji x_n i m dat je u prilogu 6.

Ako razmatramo slučaj podizanja opterećenja sa 0 na Q_0 :

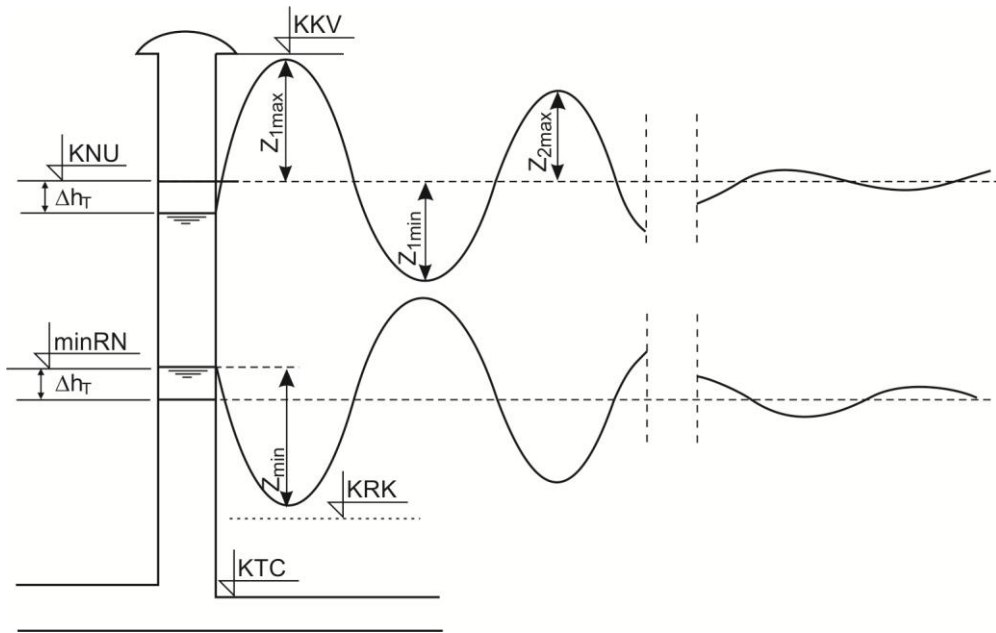
$$\Delta h_{Tk} = \Delta h_T, \quad v_k = v_0 \quad \Rightarrow \quad W_0$$

Zapremina donje komore, čiji se svod nalazi na rastojanju Δh_T od statičkog nivoa iznosi:

$$x_n=1, \quad m=0 \quad \Rightarrow \quad W_{dk} = 1,386 \cdot W_0$$

Ako se usvoji prečnik komore isti kao prečnik vodostana (D_v) (što je čest slučaj u praksi), moguće je odrediti dužinu donje komore L_{dk} .

Potrebno je nacrtati vodostan sa najnepovoljnijim gornjim i donjim oscilacijama. U nastavku je data skica sa svim neophodnim podacima koje je potrebno nacrtati. Donju komoru (ako je predviđena kao mera za prihvatanje donje oscilacije) treba nacrtati u skladu sa skicom datom u okviru opisa proračuna donje komore.



DIMENZIONISANJE DEBLJINE ZIDA CEVOVODA

Osnovni uzročnik hidrauličkog udara je inercija vode, koja se javlja pri promeni brzine kretanja, usled koje dolazi do promene pritiska (Δp). Inercijalna sila ima suprotan smer od smera ubrzanja, tako da pri usporavanju kretanja vode dolazi od povećavanja pritiska (za Δp), a pri ubrzavanju izaziva smanjenje pritiska za vrednost Δp .

Ako se posmatra realan fluid i cevovod sa elastičnim zidovima, promena pritiska (Δp) dovodi do elastične deformacije cevi (površina poprečnog preseka povećava se za Δf). Ovaj se poremećaj prenosi duž cevi (dužine L) brzinom propagacije c , koja se (za vodu) određuje korišćenjem sledeće relacije:

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_v}{K}}}$$

gde je:

E_v - moduo stišljivosti vode ($E_v = 2,1 \text{ GPa}$)

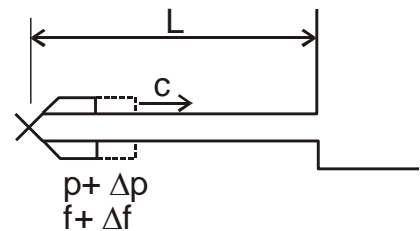
$\sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \approx 1425$ - brzina propagacija talasa u otvorenoj vodi, temperature 4°C

K - koeficijent deformacije površine poprečnog preseka cevi pri promeni unutrašnjeg pritiska. Za čelične cevovode, koji se mogu slobodno podužno pomerati, ova vrednost iznosi $K = E_\zeta \frac{\delta}{D}$

Brzina propagacije udarnog talasa kroz čelične cevi svodi se na izraz:

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E_v D_c}{E_\zeta \delta}}}$$

gde je δ - debljina zida cevovoda, D_c - prečnik cevovoda, E_ζ - moduo elastičnosti čelika ($E_\zeta \approx 210 \text{ GPa}$), odnosno $\frac{E_v}{E_\zeta} = 0,01$.



Vreme potrebno da talas stigne do početka cevi i da se vrati kao odbijeni talas naziva se faza udara (τ) i određuje se iz relacije:

$$\tau = \frac{2L_c}{c}$$

U zavisnosti od odnosa faze udara i vremena manevra (T_z) (otvaranja ili zatvaranja zatvarača) mogu se javiti dva tipa udara u cevovodu:

- Ako je $\tau \geq T_z$ - **potpun HU**

U ovom slučaju povratni talas je stigao do zatvarača kada je on već bio potpuno zatvoren. Ovakav manevar izaziva nepovoljniji, potpuni hidraulički udar. Maksimalan dodatni pritisak usled hidrauličkog udara nastaje pri promeni brzine sa maksimalne brzine (v_{max}) na nulu, tj. u slučaju naglog ispada hidroelektrane, koja je radila punim instalisanim protokom. Maksimalno povećanje pritiska javiće se na donjem kraju cevovoda i određuje se na sledeći način:

$$\Delta p_{max} = \rho \cdot c \cdot v_{max}$$

gde je v_{max} - maksimalna brzina vode u cevovodu pre manevra zatvarača.

- Ako je $\tau < T_z$ - **nepotpun HU**

Povratni talas je stigao do zatvarača pre njegovog potpunog zatvaranja, tako da povećanje pritiska nije dostiglo maksimalnu vrednost. Udar koji nastaje ovakvim manevrom naziva se nepotpun hidraulički udar. Maksimalan dodatni pritisak pri ovakvom udaru javlja se na kraju prve faze udara ($t = T_z$), a pri linearnoj promeni brzine vode [$v = v_0 (1 - t/T_z)$, v_0 - brzina vode u cevovodu pre manevra (v_{max})], iznosi:

$$\Delta p_{max} = \frac{2 \rho L_c v_0}{T_z}$$

Maksimalni pritisak u preseku na ulazu u mašinsku zgradu (neposredno ispred predturbinskog zatvarača) jednak je zbiru hidrostatičkog (p_0) i dodatnog pritiska usled hidrauličkog udara i iznosi:

$$p = p_0 + \Delta p_{max} \quad ; \quad p_0 = \rho \cdot g \cdot H_{bruto,max}$$

Maksimalno naprezanje u zidovima cevovoda određuje se korišćenjem kotlovske formule. Naime, sila kojom voda u cevovodu (pri unutrašnjem pritisku p) deluje po obimu cevi prečnika D_c , elementarne dužine dL , iznosi:

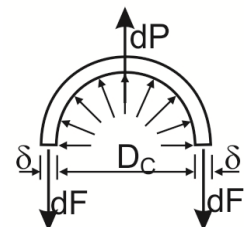
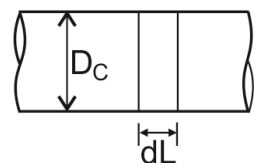
$$dP = p D_c dL$$

Ovoj sili suprotstavlja se čvrstoća zidova cevi silom:

$$dF = 2 \delta \sigma dL$$

Izjednačavanjem ovih sila dobija se napon u zidovima cevi:

$$p D_c dL = 2 \delta \sigma dL \quad \Rightarrow \quad \sigma = \frac{p D_c}{2 \delta}$$



Napon u zidovima cevi mora biti manji od dozvoljenog napona (σ_{doz}), koji zavisi od materijala od koga je cevovod napravljen. Dozvoljeni napon za čelične cevovode koji se koriste u hidroenergetici iznosi $\sigma_{doz} = 16 \text{ kN/cm}^2$ (ovu vrednost treba koristiti pri izradi elaborata), odnosno za veoma velika naprezanja 24 kN/cm^2 .

Proračun se sprovodi tabelarno određujući redom vrednosti za različite debljine zidova cevovoda. Kada se dobije napon manji od dozvoljenog (160 MPa) usvaja se dobijena debljina zida cevovoda i dobijeno vreme otvaranja zatvarača.

δ (mm)	T_z (s)	c (m/s)	τ (s)	vrsta HU	Δp_{\max} (MPa)	$p_o + \Delta p_{\max}$ (MPa)	2δ (mm)	σ (MPa)
6	5							
	7							
	10							
8	5							
	7							
	10							
10								
12								
15								
20								

Dobijenu vrednost debljine zida cevovoda δ treba proveriti i za slučaj da dođe do pražnjenja cevovoda i otkaza aeracionog ventila, odnosno do pojave vakuma u cevovodu. U tom slučaju spoljšnji atmosferski pritisak može da deformiše nedovoljno krut cevovod, ukoliko razlika spoljšnjeg i unutrašnjeg pritiska prelazi neku kritičnu vrednost. Stabilnost cevovoda (bez ukrućenja) se može postići ako je zadovoljen izraz:

$$\frac{\delta}{D_c} > \frac{1}{130}$$

Ako je navedena relacija zadovoljena usvaja se izračunata debljina zida cevovoda. Ako nije, računa se vrednost δ tako da relacija bude zadovoljena.