

IX vježba

Vodni udar u tlačnom cjevovodu

1. Uvod

Pod pojmom vodni (hidraulički) udar se podrazumijeva nagla i značajna promjena tlaka uslijed promjene brzine vode na jednom kraju cjevovoda.

Hidraulički udar se odvija pod dominantnim utjecajem sila inercije i sila elastičnosti. Brzine širenja promjene tlaka u tlačnom cjevovodu vrlo su velike te su za čelične cjevovode reda veličine 1000 m/s. Prirast tlaka na zatvaraču uslijed efekta vodnog udara može doseći vrijednosti od nekoliko desetaka bara. Prirast tlaka uslijed vodnog udara obično prati vibracije cijevi i pojava buke. Periodi oscilacije tlaka su u pravilu vrlo kratki i mogu iznositi dijelove sekunde. Izraženost efekta hidrauličkog udara ovisi o protoku kroz tlačni cjevovod, njegovoj duljini, elastičnim svojstvima, dimenzijama i vremenu trajanja manevra sa zatvaračima koji može trajati svega par sekundi.

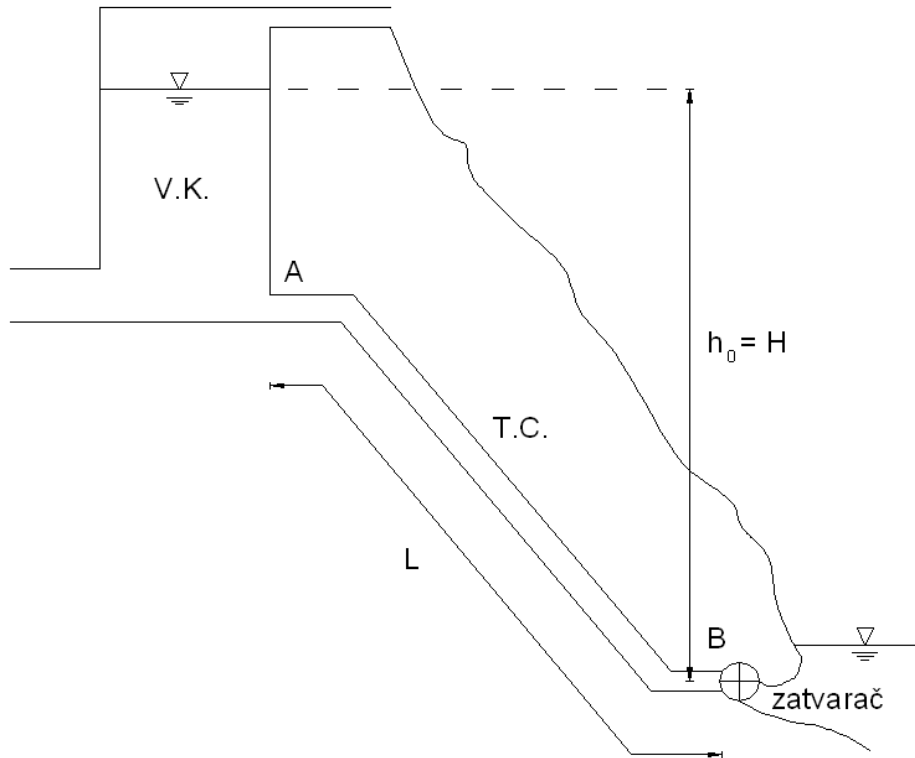
U visokotlačnim energetskim postrojenjima, vodni udar se u pravilu ne prenosi iz tlačnog cjevovoda u dovodni tunel jer pri zatvaranju, voda iz dovodnog tunela ulazi u vodnu komoru i te podiže razinu u njoj te na taj način pretvara kinetičke energiju vode u energiju položaja. Pri naglom otvaranju zatvarača na turbini (puštanje elektrane u pogon), dok se ne uspostavi stacionarno stanje, razlika dotoka između dovodnog i tlačnog cjevovoda se nadoknađuje iz vodne komore. U svakom slučaju, masa vode iz dovodnog tunela oscilira u sistemu dovodni tunel - vodna komora, gdje dominiraju sile inercije i sile trenja dok je promjena unutrašnjih sila zanemariva. Vrijeme trajanja ovih oscilacija do konačnog smirivanja može potrajati relativno dugo, ponekad i par sati. Vodni udar u tlačnom cjevovodu ni fizikalno ni vremenski ne korespondira s oscilacijama vode u sistemu dovodni tunel - vodna komora, pa se ta dva procesa mogu odvojeno izučavati i odvojeno proračunavati. Tlak na ulasku u tlačni cjevovod određen je čitavo vrijeme kotom vode u vodnoj komori. Pri proračunu vodnog udara za potrebe dimenzioniranja tlačnih cjevovoda na visokotlačnim elektranama, zanemaruje se utjecaj trenja.

Osnovni zahtjevi pri proračunu vodnog udara u tlačnom cjevovodu su određivanje maksimalnih vrijednosti tlaka i protoka na zatvaraču te na osnovu toga, dimenzioniranje cjevovoda za određeni režim zatvaranja zatvarača. Također je potrebno proračunati proces naglog puštanja turbina u pogon. U ovom slučaju, prilikom snabdijevanja tlačnog cjevovoda u početnoj fazi vodom iz vodne komore, ne smije se dopustiti ni pod kojim uvjetima ulazak zraka u tlačni cjevovod. To bi moglo dovesti do znatnog oštećenja ili puknuća cjevovoda. Kao rezultat proračuna vodnog udara, proizlaze podloge za dimenzije tlačnog cjevovoda i definiranje sigurnog režima zaustavljanja i puštanja u pogon turbina.

Pri izučavanju pojave hidrauličkog udara, temeljni i pionirski doprinos dali su u svojim radovima N. E. Žukovski (1899) i L. Allievi (1925). Po formuli Žukovskog, pri trenutnom potpunom zatvaranju, prirast tlaka na zatvaraču će doseći vrijednost $\Delta p = \rho \cdot v_0 \cdot a$, pri čemu je v_0 brzina u tlačnom cjevovodu prije zaustavljanja toka, a a brzina širenja elastičnih poremećaja.

2. Proračun prirasta tlaka uslijed vodnog udara

Proračun prirasta tlaka uslijed vodnog udara će se prikazati na jednostavnom primjeru tlačnog cjevovoda od vodne komore do turbine.



Slika 9.1 Skica tlačnog cjevovoda

Protok na zatvaraču se može izraziti pomoću jednadžbe:

$$Q = C_d \cdot \beta \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gh}$$

pri čemu je:

$$\beta = \frac{A}{A_0} \quad - \text{stupanj otvorenosti zatvarača}$$

$$h \quad - \text{tlak na zatvaraču}$$

$$C_d \quad - \text{koeficijent gubitaka u sistemu vodna komora - zatvarač}$$

Iz gornje jednadžbe se može definirati odnos između tlaka u profilu zatvarača i protoka kroz zatvarač:

$$h = \psi \cdot Q^2 = \frac{1}{2g(C_d \cdot A_0)^2 \cdot \beta^2} \cdot Q^2$$

Da bi se mogla definirati konsumpcijska ($Q-h$) krivulja potrebno je izračunati koeficijent gubitaka C_d koji se može dobiti iz početnog uvjeta:

$$t = t_0 \quad \rightarrow \quad h = h_0 = H \quad \rightarrow \quad \psi_0 = \frac{h_0}{Q_0^2} \quad (\text{izračuna se vrijednost } \psi_0)$$

$$Q^2 = C_d^2 \cdot (\beta A_0)^2 \cdot 2gh \quad \rightarrow \quad h = \frac{1}{C_d^2 \beta^2 A_0^2 2g} \cdot Q^2$$

$$\psi_0 = \frac{1}{C_d^2 \cdot \beta_0^2 \cdot A_0^2 \cdot 2g} \quad \rightarrow \quad C_d = \sqrt{\frac{1}{\psi_0 \cdot \beta_0^2 \cdot A_0^2 \cdot 2g}} \quad ; \quad \beta_0 = 1$$

Brzina širenja elastičnih poremećaja je definirana jednadžbom:

$$a = a_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_v \cdot D}{E_\epsilon \cdot s}}}$$

pri čemu je a_0 brzina širenja elastičnog vala u neograničenom fluidu. Za vodu je brzina elastičnih valova $a_0 = 1425$ m/s. Brzina elastičnih poremećaja u cijevima je manja nego u neograničenom fluidu ($a < a_0$). D je unutarnji promjer cijevi, a s označava debljinu stjenke. E_v predstavlja modul elastičnosti vode, a E_ϵ modul elastičnosti čelika.

Prikazani proračun promjene tlaka u tlačnom cjevovodu će se zasnivati na grafičkoj prezentaciji metode karakteristika, što znači da će svaki element tlačnog sustava na dijagramu biti prikazan svojom karakteristikom. U prikazanom sustavu (Slika 9.1) postoje tri elementa koji imaju svoje karakteristike i to su 1) zatvarač, 2) vodna komora i 3) tlačni cjevovod.

2.1 Karakteristika zatvarača

U zatvaraču se sa smanjenjem protjecajne površine povećavaju gubitci i time smanjuje protok kroz tlačni sustav.

Jednadžba

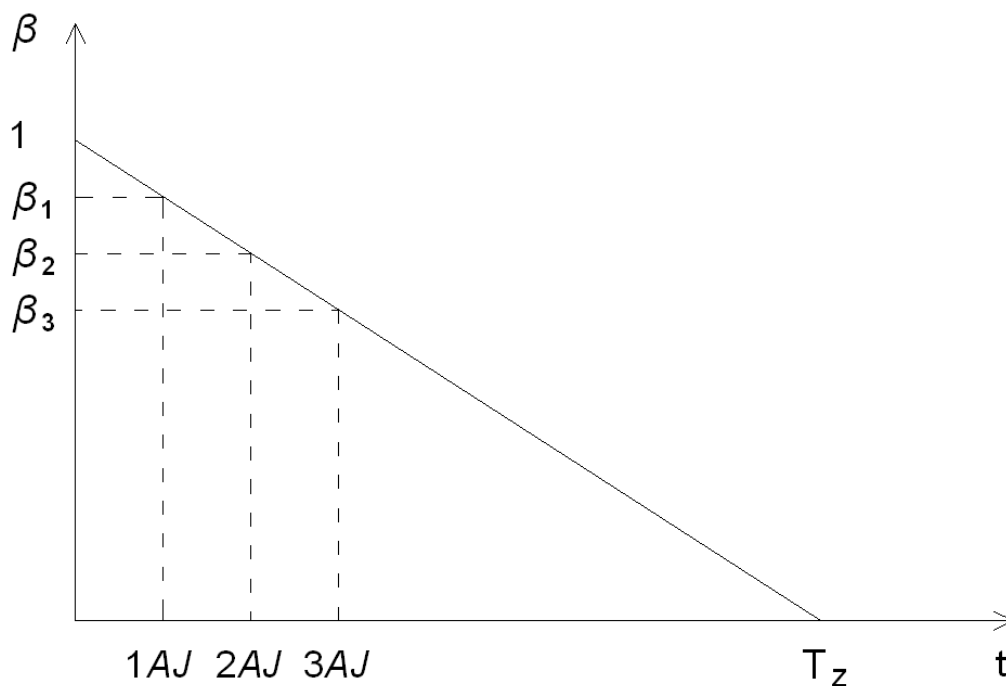
$$\psi = \frac{1}{2g(C_d \cdot A_0)^2 \cdot \beta^2}$$

predstavlja familiju parabola opisanih parametrom ψ koji ovisi o stupnju otvorenosti zatvarača β . Vrijednost ψ odredit će se za one trenutke koji odgovaraju Allievievim jedinicama tokom vremena.

Vremenski korak proračuna definiran je Allievievom jedinicom (AJ) koja predstavlja vrijeme potrebno da jedan poremećaj stigne od jednog do drugog kraja tlačnog cjevovoda

$$AJ = \frac{L}{a}$$

Na slici 9.2 je prikazan dijagram zatvaranja zatvarača iz kojeg se mogu očitati relativne površine protjecajnog presjeka u zatvaraču (β_i) za trenutke u kojima se računa vrijednost tlaka i protoka u pripadajućim trenucima $1AJ, 2AJ, \dots$



Slika 9.2 Dijagram promjene protjecajne površine u zatvaraču tijekom vremena

Na osnovu poznate promjene protjecajnog presjeka u zatvaraču (β_i) i ostalih parametara koji opisuju tlačni cjevovod (A_0 , C_d), mogu se nacrtati parabole koje definiraju odnos protoka i tlaka u profilu zatvarača. Parametri za crtanje parabola se mogu izračunati pomoću tablice 9.1.

Tablica 9.1 Računanje parametara krivulje ψ

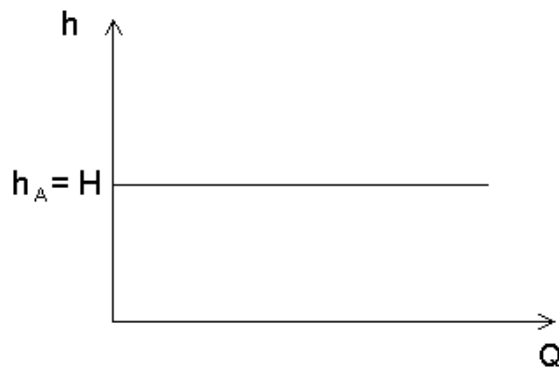
t (s)	Ψ_i	$\frac{1}{10}Q_0$	$\frac{2}{10}Q_0$	$\frac{3}{10}Q_0$	Q_0
0	Ψ_0	h_{01}	h_{02}				h_{010}
1AJ	Ψ_1	h_{11}	h_{12}				h_{110}
2AJ	Ψ_2						
nAJ	$\Psi_n = \infty$	h_{n1}	h_{n2}				h_{n10}

Napomena: Treba vrijediti: $nAJ \geq T_z$. Da bi se dobile realne vrijednosti h_n , Ψ_n ne smije biti ∞ u proračunu jer je, primjerice, $h_{n1} = \Psi_n \cdot (1/10Q_0)^2$. U ovom slučaju, protok se dijeli na desetine da bi se postigao dovoljan broj točaka na dijagramu

2.2 Karakteristika vodne komore

Obzirom da su promjene tlaka uslijed vodnog udara relativno brze u odnosu na oscilacije vodnih masa, može se usvojiti da je razina vode u vodnoj komori tijekom zatvaranja zatvarača konstantna.

Ovaj rubni uvjet se može prikazati horizontalnim pravcem na $Q-h$ dijagramu.



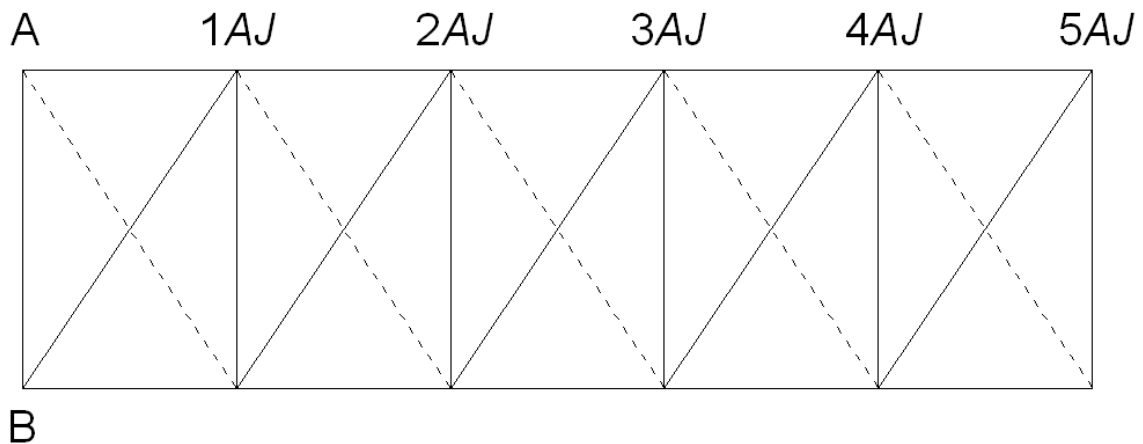
Slika 9.3 Karakteristika vodne komore

2.3 Karakteristika tlačnog cjevovoda

Za određivanje karakteristika tlačnog sistema je potrebno poznavati brzinu širenja elastičnih poremećaja (valova) u tlačnom sistemu koja je definirana jednačbom:

$$a = a_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_v \cdot D}{E_c \cdot s}}}$$

U cilju praćenja jednog elastičnog vala koji putuje od točke A (vodne komore) do točke B (turbine) i nazad, pri čemu su veličine protoka i pritlaka u početnoj točki bile poznate, može se nacrtati dijagram. Smjerovi putovanja elastičnih poremećaja su prikazani na slici 9.4.

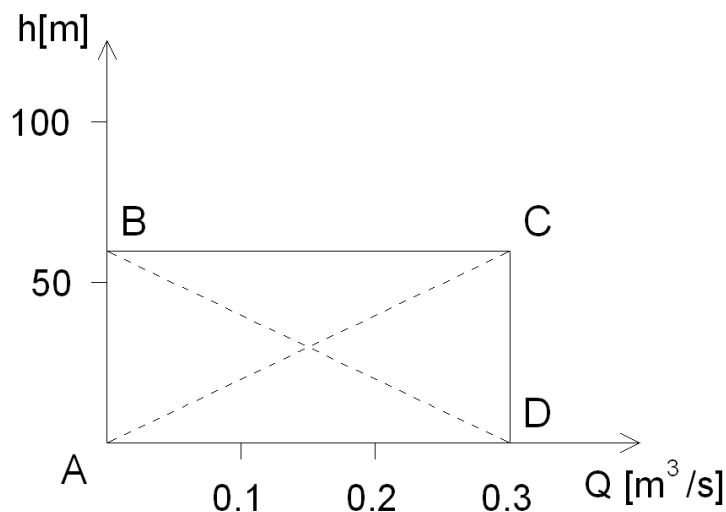


Slika 9.4 Smjerovi putovanja elastičnih poremećaja

Nagib linija putovanja vala je definiran jednačbom $\tan \alpha = \pm \frac{a}{A \cdot g}$ pri čemu je $A = \frac{D^2 \pi}{4}$

Vrijednosti dobivena na ovaj način može biti vrlo različita. Ako je brzina širenja poremećaja $a = 1000$ m/s, a površina protjecajnog presjeka $A = 0.5$ m², tada je vrijednost $\tan \alpha = 200$. Budući da $Q-h$ nije u prirodnom mjerilu vrijednost α nije od velike koristi u grafičkoj

primjeni. Da bi se konstruirala krivulja nagiba karakteristike cjevovoda, predlaže se postupak prikazan na slici 9.5.



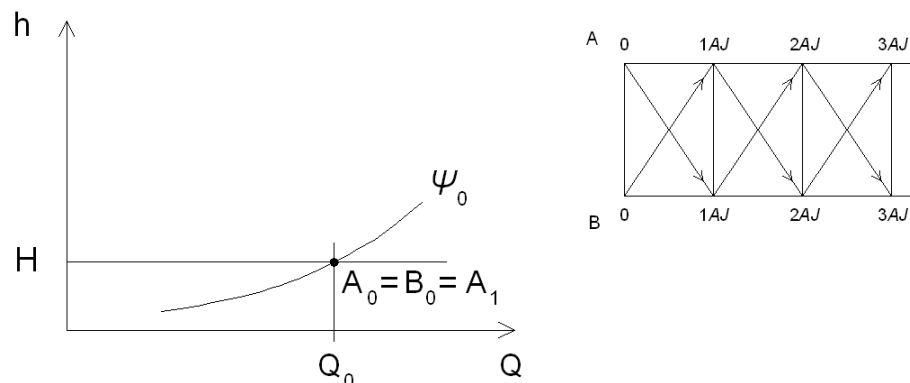
Slika 9.5 Konstrukcija nagiba karakteristike cjevovoda

Ako je recimo $a/Ag = 200$, tada se može povući pravac od $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ na apscisi (točka D) do točke $h = 60 \text{ m}$ na ordinati (točka B), čime je dobivena linija BD. Nagib linije BD je definiran izrazom $\tan \alpha = 60 / 0.3 = 200$. Sada se može nadopuniti i pravokutnik ABCD kojim je definiran i nagib pravca AC.

3. Postupak proračuna

U početnom trenutku ($t = 0 \text{ s}$) je u sistemu početni protok definiran protokom na turbini koji možemo označiti s B_0 (točka B predstavlja turbinu). Protok u točki A (točka A predstavlja vodnu komoru tj. suprotnu stranu od zatvarača na turbini) je na početku modeliranja identičan protoku u točki B. Pretpostavit ćemo da je u početnom trenutku liezometarska visina u točki A identična piezometarskoj visini u točki B (slika 9.1) jer ćemo u ovom proračunu zanemarujemo gubitke od trenja. Tlak i protok u točki A se ne može mijenjati dok iz točke B ne dođe poremećaj. To znači da je $A_0 = B_0 = A_1$ (Slika 9.6) pa se može pisati :

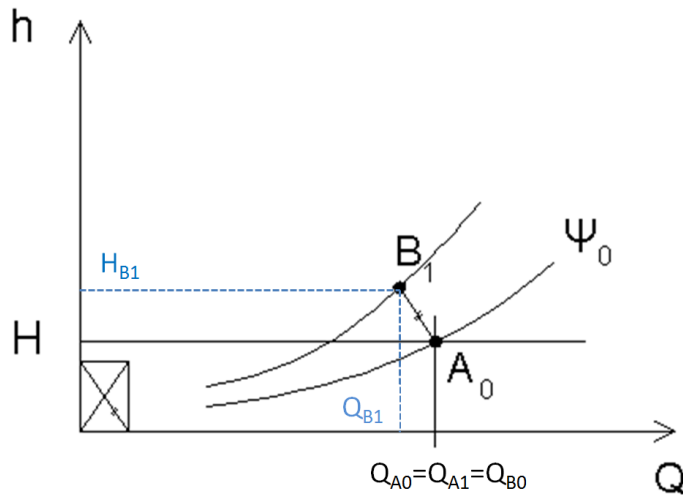
$$\text{TRENUTAK "0":} \quad \begin{array}{ll} h_A = H & h_B = H \\ Q_A = Q_0 & Q_B = Q_0 \end{array}$$



Slika 9.6 Grafički prikaz početnog uvjeta ($t = 0$)

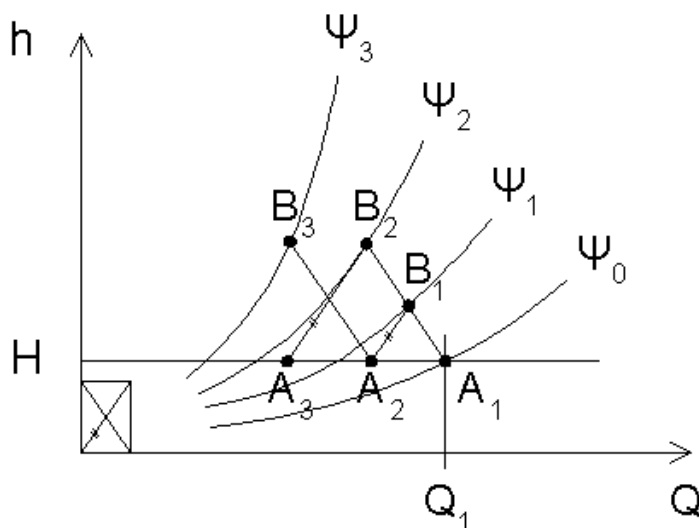
TRENUTAK "1AJ": Izvršeno je prvo sabijanje tijela vode u tlačnom cjevovodu nakon početka zatvaranja zatvarača u ciklusu elastičnih sabijanja i relaksiranja koji će uslijediti. U tom trenutku u točki A još uvijek je protok Q_0 , jer se poremećaj u periodu prve AJ odvijao samo u smjeru od točke B (sabijanje) i tek nakon prve AJ će uslijediti relaksacija (putovanje elastičnog vala od A do B tokom druge AJ). To praktički znači da se točka A_1 podudara na dijagramu s točkama A_0 i B_0 .

U trenutku 1AJ treba odrediti i položaj točke B_1 . Na slici 9.6 se vidi da poremećaj putuje od A_0 do B_1 „po pravcu“ $A_0 B_1$ u periodu od 0 do 1AJ. Točka B_1 se nalazi na krivulji ψ_1 pa slijedi konstrukcija prema slici 9.7:



Slika 9.7 Grafičko rješenje za tlak i protok u točki B_1 (točka B (turbina) u trenutku $t = 1AJ$)

TRENUTAK "2AJ": prema slici 9.8 poremećaj napreduje od B_1 do A_2 . Točkom A_2 određen je protok nakon 2AJ u točki A. Tlak u točki A_2 , kao i u svim ostalim točkama A (točkama komore) tokom cijelog proračuna iznosi H (rubni uvjet vodne komore).



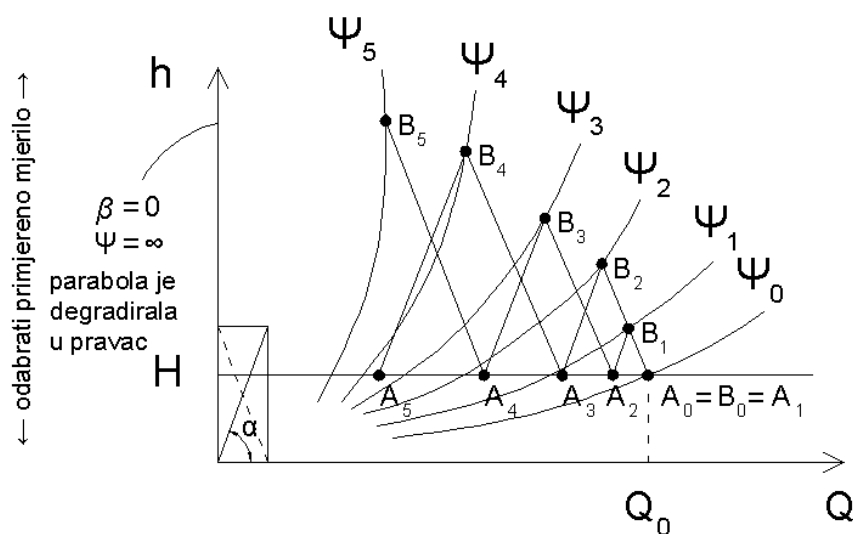
Slika 9.8 Grafičko rješenje vodnog udara za prva tri stanja

Iz točke A_1 poremećaj kreće prema točki B_2 , a točka B_2 je definirana presjekom pravca A_1B_2 i karakteristike zatvarača Ψ_2 . Iz točke B_2 poremećaj putuje prema točki A_3 po pravcu koji definira karakteristiku sistema do pravca koji definira karakteristiku vodospreme. Na sjecištu ta dva pravca se nalazi točka A_3 koja definira protok i tlak u točki A nakon tri Allievieve jedinice.

Postupak se ponavlja za iduće vremenske korake do potpunog zatvaranja zatvarača.

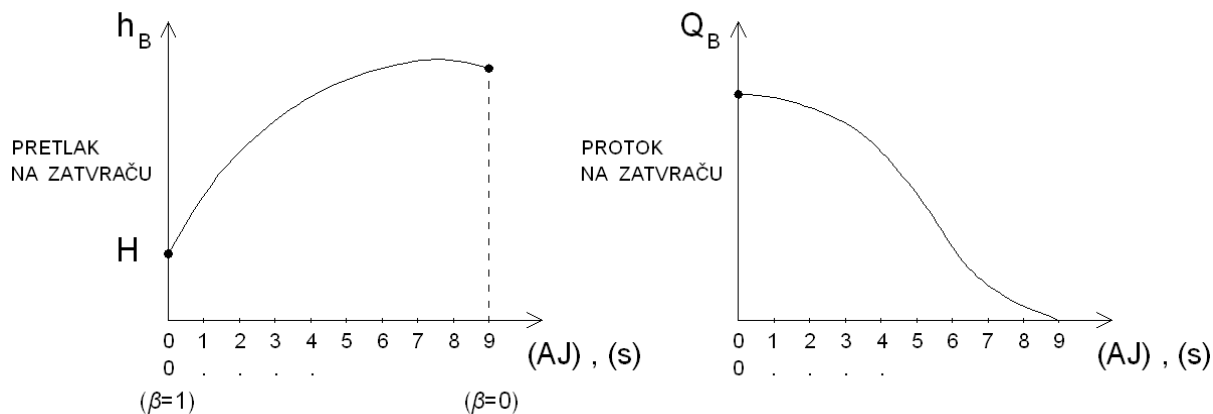
- Uočiti:
- sve točke A nalaze se na pravcu $h = H$
 - sve točke B nalaze se na krivuljama ψ , tako da je točka B_1 na krivulji ψ_1 , točka B_2 na krivulji ψ_2 , itd.

Položajem točaka A_i i B_i određen je protok i tlačna visina u i -tom koraku (trenutku)



Slika 9.9 Grafičko rješenje vodnog udara za prvih pet Allievijevih jedinica

Potrebno je prikazati i dijagrame koji su shematski prikazani na slici 9.10. U ovom slučaju je prikazan jedan mogući oblik dijagrama u slučaju da se potpuna zatvorenost zatvarača postiže za $9AJ$.



Slika 9.10 Grafički prikaz tlaka i protoka na zatvaraču

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Diplomski studij

Ak.god.

Student :

Mat.broj :

Predmet: HIDRAULIKA

Zadatak 9 : Vodni udar u tlačnom cjevovodu (Numerička vježba)

U prikazanom hidroenergetskom sustavu, na potezu od vodne komore do turbine voda se dovodi tlačnim cjevovodom od čelika, duljine L , promjera D i debljine stjenke s .

Modul elastičnosti čelika $E_{\text{č}} = 2.0 \times 10^{11}$ (N/m²), a vode $E_v = 2.03 \times 10^9$ (N/m²).

Usljed brzog zatvaranja dovoda na turbinu, doći će do vodnog udara u tlačnom cjevovodu. Za zadani sustav treba odrediti promjenu tlaka i protoka u vremenu na mjestu neposredno uzvodno od turbinskog zatvarača (točka B).

Zadano:

$$Q_0 = \quad \text{m}^3/\text{s}$$

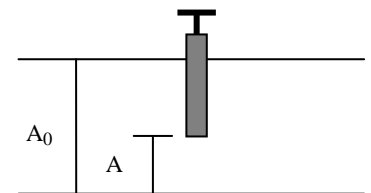
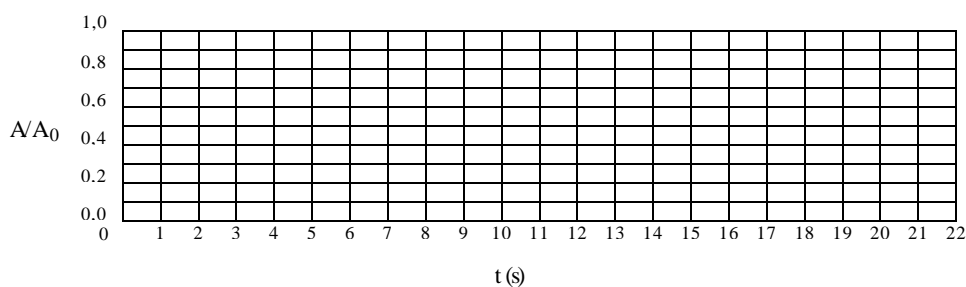
$$H = \quad \text{m}$$

$$L = \quad \text{m}$$

$$D = \quad \text{mm}$$

$$s = \quad \text{mm}$$

Režim zatvaranja dovoda na turbinu



Zadano:

Pregledao:

Rok predaje:

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Diplomski studij

Ak.god.

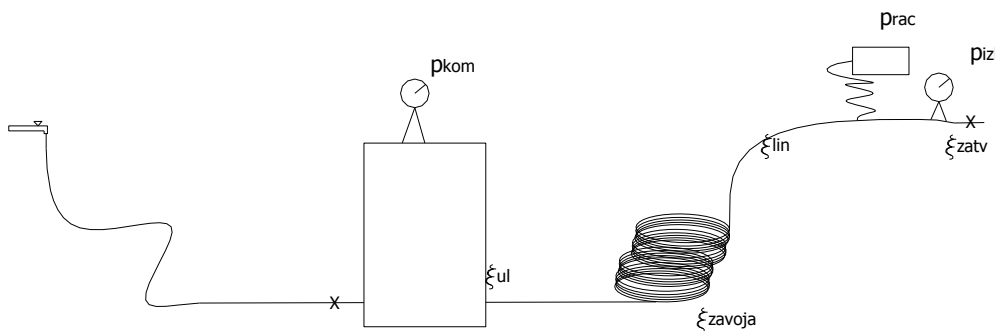
Student :

Mat.broj :

Predmet: HIDRAULIKA

Zadatak 9 : Vodni udar u tlačnom cjevovodu (Laboratorijska vježba)

Shema modela



U laboratoriju je izrađen fizikalni model na kojem se može zorno prikazati prirast tlaka uslijed nagle promjene brzine (protoka).

Model se opskrbljuje vodom iz vodovodne mreže koja kroz gibljivu cijev ulazi u zračni kotlić. Zračni kotlić ima svrhu da drži konstantnu razinu vode odnosno konstantan tlak, što se u prirodi može javiti u vodnoj komori, akumulaciji, vodospremi,... Na zračnom kotliću je ugrađen tlakomjer na kojem se može očitati vrijednost tlaka na ulazu u tlačni cjevovod. Ova vrijednost tlaka je tijekom pokusa konstantna. Na drugom kraju zračnog kotlića se nalazi ispust za tlačni cjevovod duljine 200 m. Na kraju tlačnog cjevovoda se nalaze dva zasuna i dva tlakomjera. Prvi zasun je kuglasti ventil koji služi da bi se moglo naglo zatvoriti protok vode i time formirati vodni udar. Drugi zasun je regulacioni zasun i pomoću njega se mogu nametnuti različiti protoci kako bi se mogao mjeriti prirast tlaka prilikom trenutnog potpunog zatvaranja kod različitih protoka. Osnovni cilj tlakomjera je da prikažu nastalu promjenu tlaka. Veliki analogni tlakomjer služi za vizualni prikaz prirasta tlaka, dok tlačna sonda služi za pretvaranje prirasta tlaka u analognu vrijednost koja se može nakon obrade u AD konverteru prikupiti, obraditi i prikazati na računalu.

U okviru ovog mjerenja treba voditi računa da je u ovom slučaju tlačni cjevovod relativno dugačak (200 m) te da kod provedbe proračuna kojima se računa prirast tlaka treba uzeti u obzir i utjecaj trenja.

Svrha ispitivanja:

Za zadani početni protok vode kroz model tlačnog cjevovoda je potrebno odrediti krivulju prirasta tlaka nakon potpunog trenutnog zatvaranja zatvarača. Vrijednosti dobivene mjerenjem treba usporediti međusobno te s vrijednostima dobivenim proračunom.

Tok mjerenja:

Model se pušta u pogon otvaranjem zatvarača gradskog vodovoda, potom zatvarača na komori te na kraju zatvarača na izlazu modela. Potrebno je pustiti vodu da slobodno teče otprilike 30 sekundi da se sustav odzrači i stacionira. Sustav se potom polagano zatvori i očita se tlak u vodovodnoj mreži.

Mjerenja počinju podešavanjem protoka u stacionarnom stanju počevši od maksimalnog prema manjim. Za svaki protok očitavaju se vrijednosti na tlakomjerima na izlazu, zračnom kotliću i na računalu. Određivanje protoka za svaki sljedeći korak poslije početnog (maksimalnog), izvodi se tako da na izlaznom tlakomjeru podešavamo vrijednost tlakova na 1 bar, 2 bara, 3 bara itd. Potom se volumetrijski izmjeri protok. Na kraju je potrebno trenutačno zatvoriti brzi zatvarač na izlazu iz cijevi, što pažljivije očitati vrijednosti maksimalnog prirasta tlaka na tlakomjeru kotlića i računalu te što točnije odrediti vrijeme T propagacije tlačnog poremećaja od brzog zatvarača do zračnog kotlića.

Obrada podataka:

Karakteristike sustava:

$$\begin{array}{lll}
 E_{cj} = 1000 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 & D = 2.5 \text{ cm} & \zeta_{ul} = 0.5 \\
 E_v = 2100 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 & s = 1.9 \text{ mm} & \zeta_{zavoja} = 0.5 \\
 \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 & d = D - 2s = 21.2 \text{ mm} & \zeta_{zav} = [0 - X] \text{ (ovisno o } \beta) \\
 \lambda = 0.0235 & L = 200 \text{ m} &
 \end{array}$$

Napomena: $E_{cj} = 1000 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ je modul elastičnosti cjevovoda, a njegova vrijednost odgovara vrijednosti modula elastičnosti za polietilen (PE) od kojeg je cjevovod izrađen

$$\text{Brzina širenja poremećaja: } a = a_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_v \cdot D}{E_{cj} \cdot s}}} = \frac{\sqrt{\frac{E_v}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_v \cdot D}{E_{cj} \cdot s}}}$$

$$\text{Trajanje jedne faze udara (od ukupno 4): } T = \frac{L}{a}$$

$$\text{Vrijednost prirasta tlaka pri udaru Žukovskog } \Delta H = \frac{a}{g} \Delta v$$

Tablica za proračun parametara vodnog udara

Broj mjerjenja	Q [m ³ /s]	d [m]	v [m/s]	a [m/s]	T [s]	ΔH		
						[bar]	[m.v.s]	[Pa]
1		0.0212						
2								
3								
4								
5								
6								

Zadano:

Pregledao:

Rok predaje: