

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Podkrajšek, G., 2013. Račun masnih nihanj v vodostanih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Četina, M., somentor Širca, A.): 49 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Podkrajšek, G., 2013. Račun masnih nihanj v vodostanih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Četina, M., co-supervisor Širca, A.): 49 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

GREGOR PODKRAJŠEK

RAČUN MASNIH NIHANJ V VODOSTANIH

Diplomska naloga št.: 3310/HS

**CALCULATION OF MASS OSCILLATIONS IN SURGE
TANKS**

Graduation thesis No.: 3310/HS

Mentor:

prof. dr. Matjaž Četina

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

dr. Andrej Širca

Član komisije:

doc. dr. Mojca Šraj
prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 24. 06. 2013

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Gregor Podkrajšek izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Račun masnih nihanj v vodostanih«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 10.6.2013

Gregor Podkrajšek

»Ta stran je namenoma prazna«.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.6:532.5:628.13(043.2)
Avtor:	Gregor Podkrajšek
Mentor:	prof. dr. Matjaž Četina
Somentor:	dr. Andrej Širca
Naslov:	Račun masnih nihanj v vodostanih
Tip dokumenta:	Diplomsko naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	49 str., 1 pregl., 24 sl., 4 graf., 60 en., 4 pril.
Ključne besede:	vodostan, vodni udar, nihanje vodne mase, dovodni rov, tlačni rov oziroma vod

Izvleček

V diplomskem delu je predstavljena posodobitev obstoječega programskega paketa VODOSTAN, ki omogoča preračun masnih nihanj v vodostanih. Prenovljena verzija programa s preglednim grafičnim okenskim vmesnikom omogoča enostavno uporabo ter nazoren pregled rezultatov s pomočjo animacij. Opisano je teoretično ozadje delovanja, dodani so dodatni kriteriji in pogoji vhodnih spremenljivk, ki povečujejo točnost izračunov. Na podlagi realnih primerov je prikazana primerjava med meritvami na objektih ter rezultati izračunov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 519.6:532.5:628.13(043.2)
Author: Gregor Podkrajšek
Supervisor: prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Cosupervisor: Andrej Širca, Ph.D.
Title: Calculation of water mass oscillations in surge tanks
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 49 p., 1 tab., 24 fig., 4 graph., 60 eq., 4 ann.
Keywords: surge tank, water hammer, water mass oscillation, pressure tunnel, penstock

Abstract

Graduation thesis presents the upgrade of the existing programme package VODOSTAN, with which we can calculate water mass oscillations in surge tanks. The renewed version of the program with graphic user interface is easy to use and makes clear review of results with help of animations. Theoretical background is described, additional criteria and conditions of input variables that increase accuracy of calculations are added. On the basis of real cases the comparison between the measurements and results of calculations is shown.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Četini in somentorju dr. Andreju Širci. Hvala prijateljem, ki mi vseskozi stojijo ob strani. Hvala tudi ostalim, ki so kakorkoli pripomogli pri nastanku te diplomske naloge in me spodbujali v celotnem času študija.

»Ta stran je namenoma prazna«.

KAZALO VSEBINE

Izjave	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
1 UVOD	1
2 DERIVACIJSKE HIDROELEKTRARNE Z DOVODNIM ROVOM	1
2.1 Splošno	1
2.2 Vodostan	3
2.3 Vtočni objekt	4
2.4 Dovodni rov	4
2.4.1 Obloge dovodnega rova	4
2.4.2 Hitrosti toka v dovodnem rovu	5
2.4.3 Prerez dovodnega rova	5
2.4.4 Vzдолžni padec dovodnega rova	6
2.5 Tlačni rov in vod	6
2.5.1 Hitrosti toka v tlačnem rovu in vodu	7
2.5.2 Potek in padec tlačnega rova in voda	7
2.5.3 Jekleni tlačni cevovodi	7
2.5.4 Betonski tlačni cevovodi	8
3 VODOSTAN	8
3.1 Splošno	8
3.2 Vrste vodostanov	9
3.2.1 Zgornji in spodnji vodostan	10
3.2.2 Enostavni vodostani	10
3.2.3 Vodostani s prelivom	11
3.2.4 Vodostani s komorami	11
3.2.5 Vodostani z dušilko	12
3.2.6 Diferencialni vodostani	12
3.2.7 Dvojni vodostani	13
3.3 Elementi vodostana	13
3.3.1 Povezava dovodnega rova in vodostana	13
3.3.2 Pokrov vodostana	13
3.3.3 Zračniki, oddušniki	14

3.3.4	Obloge vodostana	14
3.3.5	Višina vodostana	14
3.4	Stabilnost vodostana	14
3.5	Izpeljava osnovnih enačb za enostavni vodostan	15
3.5.1	Izpeljava dinamične enačbe	16
3.5.2	Izpeljava kontinuitetne enačbe	17
3.5.3	Reševanje sistema enačb po tangentski metodi oz. t.i. računanje po korakih	17
3.5.4	Začetni in robni pogoji sistema enačb	18
4	PROGRAMSKI PAKET VODOSTAN	18
4.1	Posodobitev programskega paketa VODOSTAN	19
4.2	Uporaba programov	21
4.2.1	Uporaba programa CHAMTANK	21
4.2.2	Uporaba programa CHAMTAM1	27
4.2.3	Uporaba programa DIFFTANK	28
4.2.4	Uporaba programa DICHTANK	32
4.3	Teoretične osnove	35
4.3.1	Izračun koeficienta trenja λ dovodnega ter tlačnega rova oz. voda	35
4.3.2	Stabilnost vodostana	36
4.3.3	Teoretične osnove programa CHAMTANK	37
4.3.4	Teoretične osnove programa CHAMTAM1	38
4.3.5	Teoretične osnove programa DIFFTANK	38
4.3.6	Teoretične osnove programa DICHTANK	40
5	IZRAČUN MASNIH NIHANJ S POMOČJO PROGRAMA CHAMTANK	41
5.1	Enostavni cilindrični vodostan	41
5.2	Vodostan s spodnjo komoro HE Plave II	43
6	ZAKLJUČEK	46
	VIRI	49
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Dopustne hitrosti vodnega toka v dovodnem rovu glede na njegovo izvedbo (Pemič in Mikoš, 2007: str 209).	5
---	---

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine na modelu vodostana, zgrajenem v hidravličnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave, za poskus trenutnega zapiranja sistema	42
Grafikon 2:	Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine na modelu vodostana, zgrajenem v hidravličnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave, za poskus postopnega linearnega odpiranja sistema	43
Grafikon 3:	Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine v vodostanu HE Plave II za primer zapiranja sistema 8. 12. 2011	45
Grafikon 4:	Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine v vodostanu HE Plave II za primer odpiranja sistema 7. 12. 2011	45

KAZALO SLIK

Slika 1:	Osnovna shema derivacijske HE z dovodnim rovom konstantnega prereza (Pemič in Mikoš 2007: str 157).	3
Slika 2:	Shema enostavnega vodostana	11
Slika 3:	Shema vodostana s prelivom	11
Slika 4:	Shema vodostana s komorami	12
Slika 5:	Shema vodostanov z dušilko	12
Slika 6:	Shema diferencialnega vodostana	13
Slika 7:	Osnovna shema derivacijske HE za izpeljavo osnovnih enačb	15
Slika 8:	Ikona programskega paketa Vodostan	19
Slika 9:	Uvodno okno programskega paketa VODOSTAN	20
Slika 10:	Program CHAMTANK (zavihek Vnos podatkov)	23
Slika 11:	Program CHAMTANK (zavihek Parametri izračuna)	24
Slika 12:	Program CHAMTANK (zavihek Rezultati)	26
Slika 13:	Program CHAMTANK (zavihek Animacija)	27
Slika 14:	Program CHAMTAM1 (zavihek Vnos podatkov)	28
Slika 15:	Program DIFFTANK (zavihek Vnos podatkov)	29
Slika 16:	Program DIFFTANK (zavihek Parametri izračuna)	30
Slika 17:	Program DIFFTANK (zavihek Rezultati)	31
Slika 18:	Program DIFFTANK (zavihek Animacija)	32
Slika 19:	Program DICHTANK (zavihek Vnos podatkov)	33
Slika 20:	Program DICHTANK (zavihek Rezultati)	34
Slika 21:	Program DICHTANK (zavihek Animacija)	35
Slika 22:	Model cilindričnega vodostana v hidravličnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave	41
Slika 23:	Vzdolžni profil HE Plave II	44
Slika 24:	Situacija območja strojnice HE Plave II	44

NOMENKLATURA

Oznaka	Opis	Enota
LATINSKE ČRKE		
<i>A</i>	maksimalna tlačna višina vodnega udara	m
<i>a_D</i>	pospešek vodnega toka v dovodnem rovu	m/s ²
<i>B</i>	tlačna višina vodnega udara	m
<i>B_{PRELIV}</i>	dolžina preliva	m
<i>B_{ZGK}</i>	širina zgornje komore	m
<i>d_D</i>	premer dovodnega rova	m
<i>D_{DCEV}</i>	debelina stene dovodnega rova	m
<i>D_{JASKA}</i>	premer vodostanskega jaška	m
<i>D_K</i>	širina komore	m
<i>D_{SPK}</i>	premer spodnje komore	m
<i>d_T</i>	premer tlačnega rova oz. voda	m
<i>D_{TCEV}</i>	debelina stene tlačnega rova oz. voda	m
<i>D_{ZGK}</i>	premer oziroma višina zgornje komore	m
<i>E_{DCEV}</i>	modul elastičnosti dovodnega rova	GN/m ²
<i>E_{TCEV}</i>	modul elastičnosti tlačnega rova oz. voda	GN/m ²
<i>F</i>	sila teže vode	kN
<i>F_D</i>	teža vode v dovodnem rovu	kN
<i>F_G</i>	komponenta teže vode v dovodnem rovu v smeri gibanja	kN
<i>F_P</i>	sila zaradi pritiska vode	kN
<i>g</i>	gravitacijski pospešek	m/s ²
<i>H₀</i>	statični padec vode	m
<i>h_A</i>	višina osi dovodnega rova v prerezu A glede na primerjalno ravnino	m
<i>h_B</i>	višina osi dovodnega rova v prerezu B glede na primerjalno ravnino	m
<i>H_D</i>	bruto padec derivacije	m
<i>h_J</i>	višina gladine vode v jezeru glede na primerjalno ravnino	m
<i>H_P</i>	denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu	m
<i>h_V</i>	višina gladine v vodostanu glede na primerjalno ravnino	m
<i>H_{VOD}</i>	ustrezna višina vodostana	m
<i>I</i>	sinus naklonskega kota dovodnega rova	-
<i>K</i>	modul stisljivosti vode	GN/m ²
<i>L_D</i>	dolžina dovodnega rova	m
<i>L_{SPK}</i>	dolžina spodnje komore	m
<i>L_T</i>	dolžina tlačnega rova oz. voda	m
<i>L_{ZGK}</i>	dolžina zgornje komore	m
<i>m</i>	masa vode v dovodnem rovu	kg
<i>maxZ_{VOD}</i>	maksimalna kota gladine v vodostanu	m.n.v.
<i>minZ_{VOD}</i>	minimalna kota gladine v vodostanu	m.n.v.
<i>N</i>	število manevrov turbine	-
<i>n_{GDROV}</i>	koeficient trenja dovodnega rova	s/m ^{1/3}
<i>n_{GTROV}</i>	koeficient trenja tlačnega rova oz. voda	s/m ^{1/3}
<i>Q_D</i>	pretok vode v dovodnem rovu	m ³ /s
<i>Q_{INST}</i>	instaliran pretok	m ³ /s
<i>Q_J</i>	pretok po jašku	m ³ /s

Q_{JZAC}	začetni pretok v jašku pred izvedbo manevrov	m^3/s
Q_K	pretok v komoro	m^3/s
Q_{KZAC}	začetni pretok v komori pred izvedbo manevrov	m^3/s
Q_P	pretok preko preliva	m^3/s
Q_{PZAC}	začetni pretok prelivanja pred izvedbo manevrov	m^3/s
Q_{RZAC}	začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov	m^3/s
Q_T	požiralnost turbin, ki je enaka pretoku v tlačnem rovu oz. vodu	m^3/s
Q_{VOD}	pretok vode v vodostanu (pozitivna vrednost nakazuje na dotok vode v vodostan, negativna pa odtok iz njega)	m^3/s
Re	Reynoldsovo število	-
R_{trenje}	energijske izgube zaradi trenja ob ostenje dovodnega rova	m
R_{vtok}	energijske izgube na vtoku v dovodni rov	m
S_D	površina preseka dovodnega rova	m^2
$S_{DUSILKA}$	prerez dušilke	m^2
S_{VOD}	površina horizontalnega prereza vodostana	m^2
T	čas (simulacije)	s
T_{KON}	končni čas izračuna	s
T_L	vztrajnostna konstanta derivacije pod pritiskom	s
T_{VU}	čas ene faze vodnega udara	s
T_Z	čas zapiranja	s
V	volumen dovodnega rova ($= L_D \cdot S_D$)	m^3
V_D	hitrost vodnega toka v dovodnem rovu	m/s
V_{HRAPD}	višina hrap dovodnega rova	mm
V_{HRAPT}	višina hrap tlačnega rova oz. voda	mm
V_{MAX}	kota pokrova vodostana	m.n.v.
V_{MIN}	kota vtoka v vodostan	m.n.v.
V_{VU}	hitrost potovanja udarnih valov	m/s
Z_{BAZEN}	kota gladine v bazenu	m.n.v.
Z_J	denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu	m
Z_{JZAC}	začetna koto gladine v jašku pred izvedbo manevrov	m.n.v.
Z_K	denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu	m
Z_{KZAC}	začetna koto gladine v komori pred izvedbo manevrov	m.n.v.
Z_{ODVOD}	kota gladine odvoda vode	m.n.v.
Z_{PRELIV}	kota preliva jaška	m.n.v.
Z_{ROVSP}	spodnja koto osi dovodnega rova	m.n.v.
Z_{ROVZG}	zgornja koto osi dovodnega rova	m.n.v.
Z_{SRSPK}	kota spodnjega roba spodnje komore	m.n.v.
Z_{SRZGK}	kota spodnjega roba zgornje komore	m.n.v.
Z_{VOD}	denivelacija oziroma koto gladine v vodostanu, merjena relativno glede na koto gladine v jezeru (merjena pozitivno navzgor od gladine v jezeru ter negativno navzdol)	m
Z_{VODZAC}	začetna koto gladine v vodostanu pred izvedbo manevrov	m.n.v.
GRŠKE ČRKE		
γ	specifična teža vode	kN
γ_{DUIN}	faktor izgub dušilke pri vtoku	s^2/m^5
γ_{DUOUT}	faktor izgub dušilke pri iztoku	s^2/m^5
Δh_D	energijske izgube v tlačnem rovu oz. vodu	m

Δh_D	energijske izgube v dovodnem rovu	m
Δt	časovni korak izračuna	s
η	faktor izgub v rovu oziroma karakteristika rova	s^2/m^5
Θ	naklonski kot dovodnega rova	°
λ	Darcy-Weissbachov koeficient trenja	-
λ_K	končni Darcy-Weissbachov koeficient trenja	-
λ_Z	začetni Darcy-Weissbachov koeficient trenja	-
μ_{DUIN}	koeficient vtoka dušilke	-
μ_{DUOUT}	koeficient iztoka dušilke	-
μ_{PRELIV}	koeficient pretoka na prelivu	-
ν	kinematična viskoznost vode	m^2/s
ρ	gostota vode	kg/m^3

1 UVOD

V sistemu derivacijske hidroelektrarne kot primeru vodnega toka pod tlakom pogostokrat prihaja do hidravličnega pojava vodnega udara, ki nastane kot posledica zapiranja turbine v primerih rednega vzdrževanja ali izrednih okoliščinah. Vodostan kot element sistema predstavlja zaščito tlačnih in dovodnih rovov pred udarnimi valovi visokega tlaka, ki ob tem nastanejo in igra pomembno vlogo pri optimalnem delovanju hidroelektrarne. Vodostan izniči negativne vplive vodnega udara v obliki dušenega masnega nihanja, ki predstavlja neškodljivo disipacijo energije, ki se sprosti med samim pojavom. Pri dimenzioniranju vodostana je potrebno rešiti dva osnovna problema. Določiti je potrebno njegov minimalni prerez oziroma zagotoviti stabilnost v primerih, ko lahko v vodostanu pride do resonance masnih nihanj med tipičnim obratovanjem hidroelektrarne. Določiti je potrebno tudi njegovo dimenzijo ter velikost, ki izhaja iz primera kritične zaustavitve ali zagona turbine v najkrajšem možnem času. V teh primerih pride do masnih nihanj z maksimalnimi amplitudami, ki vplivajo na obliko vodostana. V nadaljevanju dela je prikazano in opisano dimenzioniranje vodostana, ki zagotavlja varno in učinkovito obratovanje hidroelektrarne. To nam omogoča programski paket VODOSTAN, ki izvaja realen preračun masnih nihanj za štiri tipične primere vodostanov. Programski paket je nastal na podjetju IBE d.d. v letu 1997, avtor paketa je dr. Andrej Širca. Ker je paket zaradi oblike komunikacije z uporabnikom zastaral, se je pojavila potreba po njegovi posodobitvi. Diplomsko delo je predstavitev posodobitve, dopolnitve ter dodatnega testiranja programskega paketa.

Predstavljeni so ključni elementi derivacijske hidroelektrarne (predvsem dovodni rov ter tlačni rov oziroma vod), ki vplivajo na dimenzioniranje vodostana. Opisane so funkcije, vrste ter elementi vodostana. Izpeljane so tudi osnovne enačbe za izračun masnih nihanj. Predstavljen je programski paket z natančno obrazložitvijo uporabe ter teoretično ozadje delovanja. V zaključku sta opisana dva primera uporabe programa, kjer se je izvedla primerjava z realnimi primeri masnih nihanj (poskus masnega nihanja na modelu vodostana v hidravličnem laboratoriju Katedre za mehaniko tekočin ter obratovanje hidroelektrarne Plave II).

2 DERIVACIJSKE HIDROELEKTRARNE Z DOVODNIM ROVOM

V nadaljevanju so predstavljene vse ključne komponente derivacijske hidroelektrarne (v nadaljevanju HE) z dovodnim rovom. Pri dimenzioniranju vodostana, kot ene izmed teh komponent, se je potrebno zavedati, da vse preostale vplivajo na njegovo delovanje ter da bi brez poznavanja njihovih karakteristik težko načrtovali najprimernejšo izvedbo. Opisi komponent so smiselno povzeti po knjigi Water power development. Vol. 2, High-head power plants : midget stations and pumped-storage schemes avtorja Emila Mosonyija ter učbeniku Inženirska hidrotehnika avtorja Adolfa Pemiča ter Matjaža Mikoša.

2.1 Splošno

Hidroelektrarne so elektrarne, ki izkoriščajo razliko potencialnih energij vode na dveh različnih nivojih. Glede na višinsko razliko teh dveh nivojev delimo HE na:

- nizkotlačne HE z razliko višin manjšo od 15 m

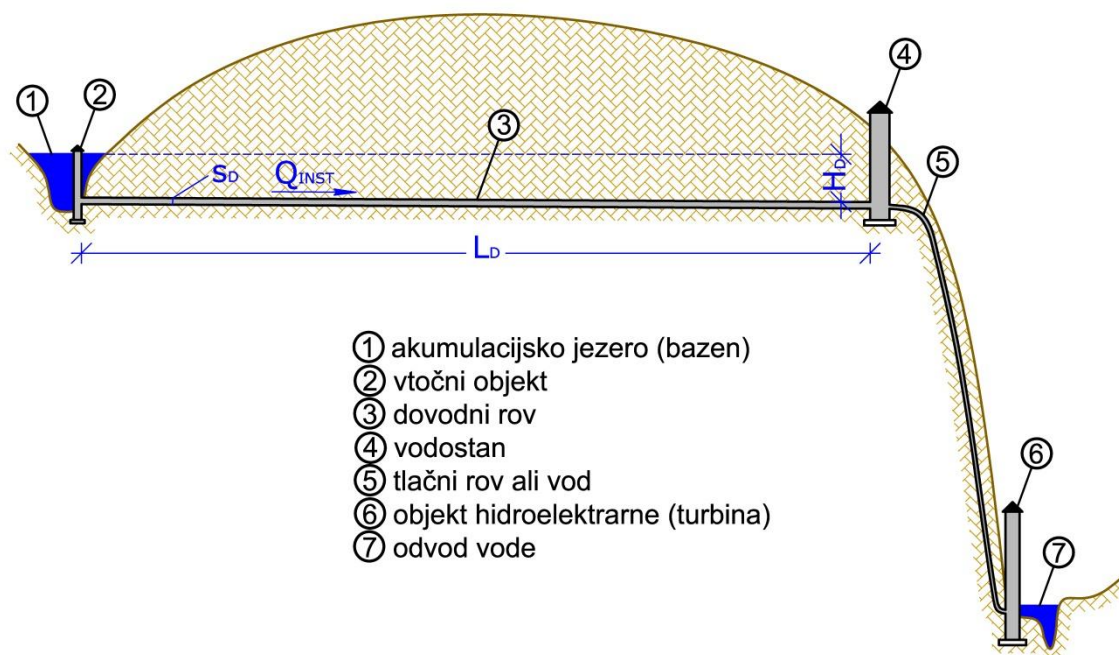
- srednjetlačne HE z razliko višin med 15 in 50 m
- visokotlačne HE z razliko višin nad 50 m

Poznamo tri glavne tipe visokotlačnih HE, ki jih delimo glede na izvedbo:

- derivacijska HE z dovodnim kanalom
- derivacijska HE z dovodnim rovom
- pregradna HE

Derivacijska HE je tip HE, za katerega je značilen daljši dovod vode (v obliki dovodnega kanala ali rova) med akumulacijskim jezerom ter objektom HE, medtem ko je za pregradno HE značilen neposreden dotok vode. Derivacijske HE z dovodnim kanalom se uporabljajo samo v primerih majhnih nihanj vodne gladine v jezeru ter odvodniku, ker bi v primeru večjega nihanja prišlo do izgub dela vodnega padca. Dovodni rovi so v primerjavi z njimi ponekod krajši ter predvsem varnejši, omogočajo neomejeno nihanje gladine v jezeru ter odvodniku, s čimer je omogočeno poljubno reguliranje pretoka, zahtevajo manjšo površino prečnih prereзов, omogočajo spremembo padca nivelete ter tudi lome višinske trase zaradi geoloških in topoloških razlogov. Uporabljajo se v najtežjih terenskih razmerah, ko kanalski sistemi niso izvedljivi ter v primerih zadostnih višinskih razlik med turbino ter stikom dovodnega ter tlačnega rova. Višine so ponavadi nekaj 100 m ali celo preko 1000 m. Komponente derivacijske HE z dovodnim rovom so naslednje:

- pregrada (zagotavlja zadrževanje akumulacije)
- vtočni objekt (globinska odzemna zgradba)
- dovodni rov
- vodostan
- tlačni rov ali vod (tudi tlačni jašek ali cevovod)
- objekt hidroelektrarne (turbina)
- odvod vode oziroma odvodnik



Slika 1: Osnovna shema derivacijske HE z dovodnim rovom konstantnega prereza
(Pemič in Mikoš 2007: str 157).

Za takšen tip HE se odločimo v primerih ugodnih lokacij pregrade, ki jim sledi dolg rečni zavo. Ugodne lokacije, h katerim težimo, so mesta najkrajših zvez med odvzemnim mestom in turbino ter turbino in odvodom vode. Poleg tega morajo ustrezne geološke, geomehanske ter hidrološke razmere na terenu omogočati vrtanje dovodnega rova preko derivacije. Ker gre s stališča izvedbe za zelo zahtevne ter drage hidrotehnične objekte, jim je potrebno določiti traso, geometrijske elemente ter pretočni režim na podlagi optimizacije stroškov gradnje in energijskih izgub. Uporaba tlorisno popolnoma izravnanih rovo in objektov na njih je zelo redka.

2.2 Vodostan

Uporaba vodostana med komponentami derivacijske HE ni nujna in je pogojena z naslednjo enačbo (Širca, 2009):

$$T_L = \frac{Q_{INST}}{g \cdot H_D} \sum_1^n \frac{L_{Di}}{S_{Di}} \quad (1)$$

T_L je vztrajnostna konstanta derivacije oziroma dovodnega rova pod pritiskom in je izražena z največjim pretokom po derivaciji oz. instaliranim pretokom Q_{INST} , bruto padcem derivacije H_D (nakazuje višino tlaka v dovodnem rovu), dolžinami posameznih odsekov derivacije L_{Di} ter površinami prerezov posameznih odsekov derivacije S_{Di} . Če govorimo o konstantnem prerezu dovodnega rova, se v izračunu uporabljata le njegova dolžina L_D ter površina prereza S_D . Če vztrajnostna konstanta po tem izračunu ne presega časa 3 do 4 sekund, potem izvedba vodostana ni potrebna. V primeru vrednosti v območju od 8 do 10 sekund je izvedba potrebna. Vrednosti med obema območjema nakazujejo vsaj na izvedbo sinhronega

izpusta. Kriterij je le orientacijski, končna odločitev pa je odvisna predvsem od vloge elektrarne v energetskega sistemu..

2.3 Vtočni objekt

Vtočni objekt ali globinska odzemna zgradba se uporablja v bazenih in akumulacijah, če obstaja znatna razlika med maksimalno ter minimalno obratovalno gladino. Glede na izvedbo zgradb ločimo:

- odzem skozi pregrado
- obrežne odzemne zgradbe
- stolpne odzemne zgradbe

Pri nizekotlačnih vodnih elektrarnah je odzemna zgradba del celote z zaježitveno zgradbo (pregrado). Pri obrežnih odzemnih zgradbah je vtok v dovodni rov nadzorovan preko jaška, ki je povezan z rovom. Vhod v jašek se nahaja nad najvišjo možno gladino jezera. Na mestu križanja jaška ter rova je vgrajena vtočna zapornica. Na vtoku, ki se v obliki lijaka zoži v rov, je vgrajena vtočna rešetka ter zapornica, ki je operativna samo v primeru, ko je gladina v jezeru nižje od vtoka. Stolpne odzemne zgradbe so samostojne zgradbe, z vseh strani obdane z vodo. Vtočni stolpi se uporabljajo redkeje kot jaški in samo v primerih velikih pretokov zaradi ugodnih hidravličnih pogojev ustrezno oblikovanih vtočnih odprtih. Stolp je sestavljen iz zunanje ter notranje krožne betonske stene. Rešetke na vtoku so nameščene na zunanji steni, medtem ko se zapornice nahajajo na notranji. Strojica je nameščena na vrhu stolpa nad najvišjo možno gladino jezera.

2.4 Dovodni rov

Za dovodne rove so značilni visoki obratovalni vodni tlaki na notranji strani ter ponavadi nižji zunanji zemeljski pritiski hribine.

Dovodne rove lahko delimo glede na globino notranjega zgornjega roba rova glede na gladino jezera:

- nizkotlačni rovi z globino manjšo od 5 m
- srednjetačni rovi z globino med 5 in 100 m
- visokotlačni rovi z globino nad 100 m

2.4.1 Obloge dovodnega rova

Osnovna naloga oblog dovodnih rogov je zagotavljanje stabilnosti, vodoneprepustnosti ter čim večje zmanjšanje hidravličnih izgub zaradi trenja. Delitev dovodnih rogov glede na izvedbo obloge, ki je odvisna od hidrogeoloških ter geomehanskih lastnosti hribine je naslednja:

- rovi brez oblog
- rovi z nosilnimi oblogami
- rovi z izravnalnimi oblogami

V primeru nizkotlačnih rogov so kamnite stene rova pogostokrat brez oblog razen v primeru razpok, ki so zadelane z betonom, betonsko malto ali brizganim betonom. Razlog vodoprepustnosti takšnih rogov so relativno majhne vodne izgube, zaradi manjših vodnih

pritisikov v rovu. Neobloženi rovi se uporabljajo tudi v primeru zelo kompaktnih, nosilnih kamnin, ki so odporne proti obrusu in imajo visok deformacijski modul. Nosilne obloge, ki delno prekrivajo stene rova, so namenjene prevzemanju zunanjih zemljskih pritiskov ter preprečevanju krušenja stropa rova. Obloge, ki v celoti prekrivajo stene in so samonosilne pa so poleg tega namenjene še prevzemanju notranjih vodnih pritiskov, preprečevanju vodnih izgub ter varovanju kamnitih sten rova pred agresivnostjo vodnega toka. Izvedba z delnimi izravnalnimi oblogami je namenjena zmanjšanju hidravličnih izgub, celotna obloga pa se uporabi le v primeru močno zdrobljene in nekompaktne okoliške kamnine ali pa v primeru močne agresije vode. Obloge po celotnem obodu se ponavadi uporabljajo pri srednjetačnih rovih, kjer pričakujemo relativno visoke vodne izgube ter možnost prepustnosti kamninskih sten rova, četudi so te pred tem za vodo neprepustne, zaradi povečanih vodnih pritiskov.

Obloge so izdelane iz nearmiranega betona, armiranega (klasična armatura ali prednapetje) ter brizganega betona z zaključnim betonskim ometom, ki zagotavlja ugodne hidravlične razmere v rovu. V visokotlačnih rovih pa tudi takšen tip oblog včasih ni zadovoljiv in se namesto njih uporablja jeklene cevi iz mehkega konstrukcijskega jekla. Gre za obloge, ki veljajo za najbolj varne tekom obratovanja, vendar z izredno visoko ceno vgradnje. Ker je izvedba samonosilnih oblog prav tako pogojena z visoko ceno, se je uveljavilo sodobno načelo gospodarne izvedbe rovov po letu 1950, ki zahteva sodelovanje obloge in hribine pri prevzemanju obratovalnih tlakov.

2.4.2 Hitrosti toka v dovodnem rovu

Hitrosti vodnega toka v rovu so v povezavi s hidravličnimi izgubami omejene z namenom reduciranja stroškov izgradnje. Mejne hitrosti so odvisne od vsebnosti sedimentov v vodi. V primeru, da sedimenti ne presegajo frakcij mulja, so mejne hitrosti naslednje:

Preglednica 1: Dopustne hitrosti vodnega toka v dovodnem rovu glede na njegovo izvedbo (Pemič in Mikoš, 2007: str 209).

Izvedba dovodnega rova	Dopustne hitrosti V_D (m/s)
Neobložen rovu brez premaza (zelo hrapav)	1,0 – 2,0
Neobložen rovu delno s cementnim premazom	1,5 – 3,0
Izbrušen cementni premaz	2,0 – 4,0
Betonska obloga	2,0 – 4,0
Jeklena obloga	2,5 – 7,0

2.4.3 Prerez dovodnega rova

Za hidravlično in statično najustreznejši prerez dovodnih rovov velja krožni prerez. Minimalni svetli premer krožnih rovov znaša 1,8 m, medtem ko so delovni premeri zaradi vrtnja, namestitve vrtnega stroja, zračenja, prevoza ljudi in materiala, dreniranja višji in znašajo od 2,5 do 3,0 m. V primeru rovov, ki so izkopani v kamnini visoke trdnosti se uporabljajo kvadratni ter pravokotni prerezi z višjimi vertikalnimi stranicami rova. Za pravokotne prereze velja minimalna omejitev 2,0 x 1,6 m.

2.4.4 Vzдолžni padec dovodnega rova

Naklon dna dovodnega rova v normalnih pogojih znaša 2 – 4 ‰ in ni višji kot je potrebno za odvodnjavanje odvečne vode med gradnjo ter kasnejšimi popravili. Smer izkopavanja rova je zato vedno proti njegovemu padcu, kar omogoča gravitacijski odtok vode. Težimo k enotnemu padcu po celotni dolžini, če to geološke razmere dopuščajo.

2.5 Tlačni rov in vod

Za tlačne rove in vode je značilna izpostavljenost visokim hidravličnim tlakom tudi zaradi pojava vodnega udara, kar zahteva njihovo popolno vodoneprepustnost.

Poznamo jeklene, armiranobetonske, kombinirane (npr. armiranobetonski cevovod znotraj ojačan z jekleno oblogo) ter tudi lesene tlačne cevovode, ki jih dandanes ne uporabljamo več. V odvisnosti od izvedbe jih delimo na štiri vrste:

- izkopani tlačni rovi (podzemni)
- v celoti zakopani tlačni vodi (podzemni)
 - zasuti
 - speljani v posebej zgrajenih betonskih jaških
- deloma zakopani tlačni vodi
- tlačni vodi, ki so v celoti izpostavljeni zunanjim vplivom (nadzemni)

Zakopani vodi so na celotni dolžini podprti z utrjeno zemljino v jarku ali armiranobetonskimi ploščami jaškov, ki so po položitvi voda zasuti. Debelina varovalnega sloja zemljine nad vodom znaša 1,0 do 1,2 m. Izvajajo se pri blagih naklonih terena, kjer vrhnja zemljinska plast omogoča vkopavanje. Prednosti takšnega tipa tlačnega rova so:

- rov ni izpostavljen zunanjim temperaturnim spremembam, nevarnosti zemljskih ter snežnih plazov in padajočih dreves, nevarnosti namernih poškodb
- voda v rovu je zaščiten pred mrazom
- brez vpliva na podobo pokrajine
- kontinuirana podpora rova

Slabosti pa so naslednje:

- zaradi ovirane dostopnosti je oteženo redno pregledovanje in kontrola
- dražja vgradnja v primeru večjih premerov ter kamninske podlage
- drsenje rova pri strmih pobočjih, še posebej v primerih, kjer ima zemljina manjši koeficient trenja

Vodi, ki so izpostavljeni zunanjim vplivom, so izvedeni nad terenom in so podprti s podporami oziroma sedli (betonski ali sidrani bloki). Stika med terenom ter vodom ni, razen na posameznih podporah. V primerjavi z zakopanimi rovi se uporabljajo pogosteje. Prednosti takšnega tipa tlačnega voda so:

- zaradi neovirane dostopnosti je omogočeno redno in enostavno pregledovanje in kontrola med samim obratovanjem HE
- cenejša vgradnja v primeru večjih premerov ter kamninske podlage
- varovanje pred plazovi je omogočeno z ustrezno projektiranimi podporami

- enostavna in gospodarna izvedba

Slabosti pa so naslednje:

- izpostavljenost zunanjim temperaturnim spremembam ter ostalim atmosferskim vplivom
- dopuščajo možnost namernega poškodovanja v primeru vojn in sabotaj
- nevarnost pojava visokih vzdolžnih napetosti v vodu med posameznimi podporami, še posebej pri vodih večjih premerov ter nizkih notranjih vodnih tlakih
- ne predstavljajo sonaravnega elementa v okolju

2.5.1 Hitrosti toka v tlačnem rovu in vodu

Ekonomske hitrosti toka v tlačnem rovu so omejene ($6 \text{ m/s} \leq v \leq 9 \text{ m/s}$), zato je potrebno za optimalni premer rova izvesti analizo racionalnosti.

2.5.2 Potek in padec tlačnega rova in voda

Za samo traso rova ali voda velja načelo, da je ta čim krajša in je odvisna zlasti od vodnega udara ter varnosti in gospodarnosti izvedbe. V večini primerov HE se uporablja enojni tlačni cevovod, saj je to najbolj ekonomična rešitev. Le v primerih, ko premer ter debelina sten cevovoda močno otežujeta izgradnjo, se uporablja večkratni dovod vode na turbine.

Naklon jaška tlačnega rova je odvisen od dimenzij sistema, geoloških značilnosti hribine ter načina vrtnja. Možni so vsi nakloni vrtnja, praviloma pa niso manjši od 45 %. Možno je tudi navpično vrtnje ob primernih geoloških pogojih, kar omogoča enostavnejše odstranjevanje izkopanega materiala. Ko tlačni vod sledi terenu, prihaja na spremembah vzdolžnega padca do lomov voda. Med projektiranjem skušamo doseči čimbolj raven potek voda po terenu navzdol, vendar so spremembe smeri včasih neizogibne.

2.5.3 Jekleni tlačni cevovodi

Najpogosteje uporabljen material je mehko konstrukcijsko jeklo, v preteklosti se je uporabljalo tudi lito železo ter lito jeklo. Za manjše premere od 300 do 400 mm, izjemoma do 600 mm se uporablja brezšivno valjano ali vlečeno mehko konstrukcijsko jeklo debeline med 6 in 30 mm. Dolžine posameznih odsekov voda znašajo med 6 in 8 metri. Vodi srednjih premerov med 2,0 ter 3,0 m so narejeni iz jeklenih plošč srednje trdnosti z vzdolžnimi varjenimi spoji, ki so primerni tudi za visoko-tlačne HE. Dolžine posameznih odsekov voda znašajo med 4 in 8 metri in so odvisne od transportne kapacitete. Vodi večjih premerov nad 3,0 m na mesto vgradnje niso transportirani kot celotni posamezni vzdolžni odseki rova oziroma v obliki cevi, ampak kot polovice oziroma tretjine obroča cevi. Dolžine posameznih odsekov voda znašajo med 6 in 8 metri. Uporabljajo se vroče valjane jeklene plošče z vzdolžnimi varjenimi spoji. Jeklene cevovode izdelujejo neojačane, ojačane z obroči (bandažirane) ter prednapete (natikanje obročev na cev v vročem in hladnem stanju). Bandažiranje ter prednapenjanje se uporablja, če debelina stene neojačane cevi presega tehnološko mejo varjenja na gradbišču (40 – 50 mm). Tekom projektiranja velja pravilo, da se premer tlačnega rova zmanjšuje proti dnu ter povečuje debelina cevi na treh do šestih mestih zaradi konstrukcijskih razlogov, pospeševanja transporta ter primarno zaradi povečevanja vodnih pritiskov.

2.5.4 Betonski tlačni cevovodi

Betonski tlačni cevovodi se uspešno uporabljajo v primerih nizekotlačnih HE in so v večini primerov vkopani, lahko pa so izpostavljeni tudi zunanjim vplivom. Najpogosteje se uporablja krožni prerez, pri velikih premerih pa je statično ugodnejši rahlo sploščen eliptični prerez. Betonski cevovodi s krožnim premerom manjšim od 1 m so vedno narejeni tovarniško, cevi večjih premerov so lite na mestu vgradnje. Poznamo dva tipa tovarniško narejenih armirano-betonskih cevi:

- klasično armirani cevovodi
- prednapeti cevovodi

Tovarniško narejene cevi so premera med 300 in 3000 mm, dolžine posameznih odsekov pa znašajo 3 do 7 m. Debeline sten so med 6 in 25 cm.

V primeru škodljivih primesi v vodi je potrebno betonskemu rovu z notranje strani izvesti zaščitni plašč. Zunanji plašč pa je potreben v primeru agresivne zemljine ter talne vode, ki bi lahko prodrla v sam rov in je izveden iz bitumenske hidroizolacije.

3 VODOSTAN

3.1 Splošno

V primeru, da se dovodni rov šele v večji oddaljenosti od zgornjega jezera usmeri navzdol proti turbini, je potrebno na mestu spremembe padca preprečiti pretrganje vodnega stolpca z izgradnjo vodostana (gre za zgornji vodostan, poznamo tudi izvedbe s spodnim vodostanom). Vodostan je preprosto rečeno vodni zbiralnik ali izravnalnik, namenjen polnjenju z vodo in služi dvema različnima namenoma:

- 1) V primeru hitrega ali celo hipnega ustavljanja turbine se vodni masi v dovodnem ter tlačnem rovu močno zmanjša hitrost. Zaradi njene vztrajnosti pride na dnu tlačnega rova do pojava visokih tlakov, ki se obliki udarnega vala širijo navzgor po sistemu do dovodnega rova. Gre za t.i. pojav vodnega udara, ki je izničen šele, ko val doseže prosto vodno gladino. S tem namenom je vodostan postavljen pred dovodni rov in ga tako ščiti pred poškodbami, ki bi nastale ob izpostavljenosti visokim tlakom. Vodostan s svojo vodno maso odbija val nazaj proti turbini.
- 2) Med zagonom turbine bi med dovodnim ter tlačnim rovom zaradi vztrajnosti vodnih mas oziroma razlike v padcu dna prišlo do diskontinuitete pri zagotavljanju dovolj velike količine vode. Vodostan zato na mestu stika obeh rogov zagotavlja primerno zalogo vode.

Zaradi nihanja potrebe po električni energiji se hitrost turbine vseskozi prilagaja, čemur s časovno zakasnitvijo sledi tudi gibanje vodnih mas v rovih. Ob zmanjšanju hitrosti se tako gladina v vodostanu dviga ter obratno ob povečanju zniža. Višino vodostana tako lahko določimo v kritičnem primeru hipnega ustavljanja turbine. Ciklu, ki se tekom obratovanja hidroelektrarne vseskozi ponavlja, pravimo masno nihanje. Ker pa na amplitude nihanja vplivajo faktorji trenja, govorimo o dušenem masnem nihanju.

Da bi vodostan v čim večji meri služil svojemu namenu, mora biti lociran čim bližje objektu HE. Razlog tiči v lastnostih vodnega udara. O popolnem vodnem udaru govorimo, ko se tlačni valovi, ki nastanejo pri zapiranju turbine, vrnejo do le-te, ko je popolnoma zaprta in je pretok onemogočen. V tem primeru pride do pojava maksimalnih tlakov, ki bi lahko povzročili poškodbe na sistemu. Temu se poskušamo izogniti z zmanjšanjem dolžine propagacije valov (dolžino tlačnega rova čim bolj zmanjšamo), kar posledično vpliva na zmanjšanje velikosti tlakov. Težimo tudi k podalševanju časov zapiranja turbine (npr. linearno zapiranje turbine), če je le-to možno, saj s tem ukrepom prav tako vplivamo na zmanjšanje tlakov. Tlačni valovi se v teh primerih vrnejo do turbine, ko je ta še odprta in v teh primerih govorimo o nepopolnem vodnem udaru. Oba ukrepa zmanjšanja vpliva vodnega udara sta razvidna iz naslednje enačbe (Rajar, 1980), ki določa velikost nadtlakov, ki lahko nastanejo:

$$B = A \cdot \frac{T_{VU}}{T_Z} \quad (2)$$

A predstavlja maksimalno velikost nadtlakov, ki lahko nastanejo v sistemu, T_Z čas zapiranja turbine, T_{VU} čas ene faze vodnega udara (čas, v katerem se motnja vrne na svoj začetek) in je razviden iz enačbe (Rajar, 1980):

$$T_{VU} = \frac{2 \cdot L_T}{v_{VU}} \quad (3)$$

L_T predstavlja dolžino tlačnega rova oz. voda, v_{VU} pa hitrost potovanja udarnih valov, ki je odvisna od gostote vode ρ , stisljivosti vode K , premera tlačnega rova d_T , debeline stene cevi tlačnega rova D_{TCEV} ter njenega modula elastičnosti E_{TCEV} :

$$v_{VU} = \sqrt{\frac{K}{\delta \cdot \left(1 + \frac{K \cdot d_T}{D_{TCEV} \cdot E_{TCEV}}\right)}} \quad (4)$$

3.2 Vrste vodostanov

V praksi se uporablja široka izbira vrst vodostanov, ločimo jih glede na način gradnje, lokacijo ter obliko.

Glede na način gradnje ločimo:

- vodostane, ki so v celoti izkopani v kamnini
- vodostane, ki se v obliki prostostojećih stolpov dvigujejo nad okoliški teren
- vodostane, ki so deloma izkopani v kamnini, deloma pa se komora dviguje nad okoliški teren

Glede na lokacijo ločimo:

- zgornji vodostan
- spodnji vodostan

Glede na obliko pa ločimo naslednje vodostane:

- enostavne
 - cilindrični

- cilindrični s prelivom
- specialne
 - s komorami
 - s spodnjo komoro
 - z zgornjo komoro
 - s spodnjo in zgornjo komoro
 - s spodnjo, srednjo in zgornjo komoro
 - z dušilko
 - diferencialni
 - Johnsonov
 - pnevmatski
 - dvojne
 - številne kombinacije osnovnih tipov (vodostanski sistemi)

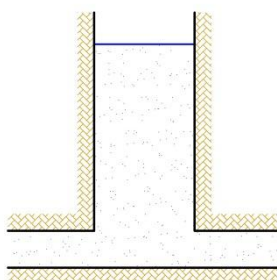
Specialni vodostani so bili razviti z namenom reduciranja potrebnega delovnega volumna in s tem zmanjšanja stroškov izgradnje na minimalno vrednost, kar pa ni nujno povezano z enostavnostjo le-te. Pri izbiranju tipa vodostana tako stremimo k njegovi maksimalni učinkovitosti ob čim manjšem volumnu. Zmanjšanje je lahko doseženo z zmanjšanjem prečnih prereзов vodostana ter omejevanjem amplitud masnih nihanj. Zavedati pa se je potrebno, da je z omejevanjem amplitud povezana tudi nižja stopnja varnosti.

3.2.1 Zgornji in spodnji vodostan

Spodnji vodostan je potrebno zgraditi v primeru, če je odvodni rov od turbine do reke dolg in lahko pride tudi do nadtlakov s spodnje strani zaradi povratnega vodnega udara v primeru hitrega odpiranja turbine. Takšen tip vodostana se uporablja pri reverzibilnih črpalnih HE, ki v času minimalnih obremenitev v omrežju, črpajo spodnjo vodo v zgornje jezero. V takšnem primeru spodnji vodostan dobi podobno funkcijo kot zgornji ob normalnem obratovanju.

3.2.2 Enostavni vodostani

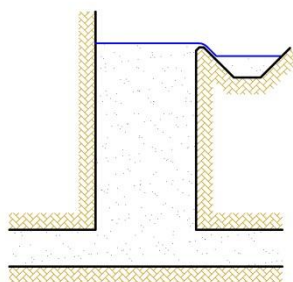
Za njih je značilno enostavno dimenziniranje ter praktično izredno zanesljivo delovanje. Pomankljivost takšnih vodostanov je velika poraba prostora in materiala, kar vodi do visokih stroškov izvedbe v zameno za povprečno dušenje masnih nihanj. Poznamo izvedbe v obliki cilindričnih bazenov ali jaškov z enakomernim krožnim prerezom po vsej višini z možnostjo dodatno izvedenega preliwa. Poznamo tudi modificirane poševe izvedbe cilindričnih vodostanov, kjer je zaradi večje površine vodoravnih eliptičnih prereзов potrebna manjša gradbena višina vodostana. Enostaven tip vodostanov se praktično ne uporablja nikjer več in ima samo še muzejsko vrednost. Primeren je za razlago osnovne hidravlike, povezane s pojavom vodnega udara in predstavlja osnovo za razumevanje delovanja ostalih bolj kompleksnih vodostanov.



Slika 2: Shema enostavnega vodostana

3.2.3 Vodostani s prelivom

Cilj dimenzioniranje vodostanov je čim hitrejši dvig vode v njem, kar lahko izvedemo s prelivom, kjer voda izteka na prosto. Takšnemu izvajanju vodostanov morajo seveda ustrezati razmere na terenu, urediti pa je potrebno tudi ustrezno podslapje, ki odvaja vodo s preliva v spodnje jezero. Neizkoriščena voda pomeni za izkoristek izgubo, ki jo je potrebno upoštevati znotraj predhodne ocene ekonomičnosti. Takšen tip vodostana se danes uporablja zelo redko.

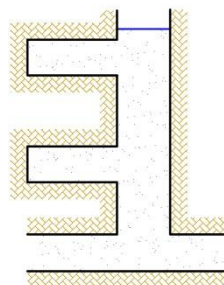


Slika 3: Shema vodostana s prelivom

3.2.4 Vodostani s komorami

Pri enačenju kinetične energije vode v dovodnem rovu pri normalnem obratovanju HE ter potencialne energije vode v vodostanu na maksimalni koti pri zaustavitvi turbine ugotovimo, da lahko zmanjšamo potrebni volumen vodostana ob upoštevanju, da je težišče vodne mase čim višje ob zapiranju. Če bi tako pri cilindričnem vodostanu zgradili pri vrhnjem delu zelo prostorno komoro, bi lahko teoretično zmanjšali potrebni volumen vodostana za polovico. Pri odpiranju velja obratni princip, kjer težimo k temu, da je težišče vodne mase čim nižje. Zato se gradijo zgornje in spodnje komore v obliki stranskih galerij, ki ju povezuje le ozek jašek. Zaradi pretakanja vode v horizontalnih jaških pa prihaja še do dodatnih energijskih izgub, ki ugodno vplivajo na dušenje masnih oscilacij. Pri lociranju komor je potrebno upoštevati, da je zgornja komora nad nivojem polnega jezera, spodnja pa pod minimalno koto jezera. Razporeditev obeh komor ni nujno simetrična glede na same komore ali jašek. V primeru asimetrije govorimo o asimetričnih vodostanih s komorami. Takšna razporeditev komor ni pogojena z izboljšanjem hidravličnih razmer, ampak je posledica prilagajanja na konstrukcijske pogoje, predvsem na geološke razmere na območju izgradnje. V primeru velikih višinskih razlik med maksimalno ter minimalno višino gladine gibanja vodnih mas

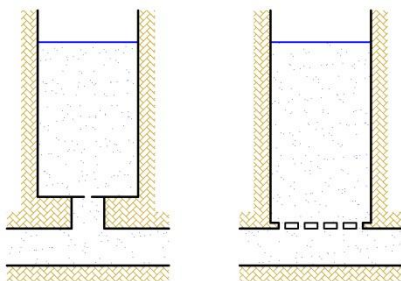
lahko izvedemo tudi vodostan s srednjo komoro. Vodostane s komorami odlikuje predvsem enostavno dimenzioniranje, razmeroma preprosta gradnja ter zanesljivo delovanje. Uporabljajo se pri visokotlačnih akumulacijskih HE in se v novejšem času izvajajo z dušilkami.



Slika 4: Shema vodostana s komorami

3.2.5 Vodostani z dušilko

Za vodostane z dušilko je značilna zožitev pri dnu vodostana cilindrične oblike, ki povzroča energijske izgube, ko voda priteka ali odteka iz vodostana. Gre za dušilko, ki je lahko vgrajena v vhodno odprtino, ozek jašek ali na perforirano ločilno ploščo med rovom ter vodostanom. Poznamo naslednje izvedbe dušilk: odprtine z različno oblikovanimi natoki, sita, rešetke, pokrovi, vrtnične dušilke (diode, triode) ter specialne izvedbe. Povzročajo nagle tlačne spremembe, ki ugodno vplivajo na dušenje masnih nihanj. Pri dotoku je hitrost dviganja gladine sicer majhna, vendar pod dušilko pride do povečanega tlaka, kar zavira dotok vode po dovodnem rovu. Pri odtoku se pod dušilko ustvari podtlak, kar omogoča hitrejše odvajanje vode v dovodnem rovu. Prednost takšne vrste vodostanov je dobro dušenje masnih nihanj, razmeroma preprosta izvedba, zanesljivo obratovanje ter možnost uporabe asimetričnih dušilk (koeficient izgube dušilke je različen pri vtoku ali iztoku iz vodostana). Slabost pa je prenos dodatnih tlakov v dovodni rov, potrebne so modelne preiskave ter upoštevati je potrebno omejitve pri asimetriji dušilk. Uporabljajo se pri visoko ter srednjetačnih akumulacijskih HE.

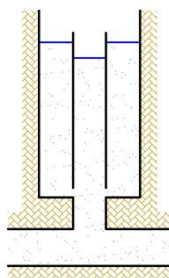


Slika 5: Shema vodostanov z dušilko

3.2.6 Diferencialni vodostani

Glavnemu vodostanskemu jašku je dodana še diferencialna komora, med njima pa je na vrhu izveden preliv, ki omogoča prosto prelivanje vode ter dušilka na dnu pri vtoku v komoro. Namen komore je, da se gladina v njej dviguje ali spušča počasneje kot v jašku. Jašek je

lahko v sredini ali ob strani komore in skupaj s komoro omogočata dodatno zaviranje ali pospeševanje vodnih mas v dovodnem rovu. Spremembe tlaka niso trenutne in vrednost nadtlaka je točno določena, kar pomeni nekoliko slabšo učinkovitost. Ta tip vodostana se uporablja pri srednjetačnih HE. Pomanjkljivost diferencialnih vodostanov je razmeroma zahtevna izvedba, potrebne so modelne preiskave dušilk ter omejitve pri asimetriji dušilk.



Slika 6: Shema diferencialnega vodostana

3.2.7 Dvojni vodostani

Gre za medsebojno povezane vodostane, ki se glede na medsebojno razporeditev ter lokacijo glede na turbino delijo na dve osnovni vrsti: povezava dveh cilindričnih vodostanov ter povezava cilindričnega vodostana ter nagnjenega jaška.

3.3 Elementi vodostana

3.3.1 Povezava dovodnega rova in vodostana

Prečkanje dovodnega rova skozi presek vodostana je z vidika hidravlične ustreznosti neprimerno. Voda, ki prihaja iz rova se do določene mere razširi po vodostanu, na iztoku naprej v dovodni rov pa prihaja do njene zgojitve. Zaradi teh dveh razlogov ter dodatnega trenja ob vstopu vode v vodostan prihaja pri tem načinu spajanja do večjih izgub. Veliko bolj ustrezno je, če rov speljemo pod ali ob vodostanu, vendar to velja le za enostavne vodostane ter jaške s komorami. V primeru uporabe dušilk je takšna izvedba nemogoča, saj velja, da se povezava med vodostanom ter rovom smatra kot dušilka v primeru, ko je prerez povezave manjši od 40 do 60 % prereza rova.

3.3.2 Pokrov vodostana

V primeru vodostana, ki je deloma vkopan, je izvedba pokrova komore z relativno velikim premerom izredno draga. Temu se lahko izognemo ter izvedbo pokrova preprosto nadomestimo s fino mrežo ob dnu komore ob vtoku v tlačni rov. Ob tem ukrepu pa moramo računati z dodatnimi izgubami zaradi pretoka vode preko mreže. Pri uporabi takšnih ukrepov v primeru diferencialnih vodostanov se žičnate mreže na rešetkah montirajo na vrhu ter ob odprtinah med jaškom ter glavno komoro. V celoti izkopani vodostani imajo lahko pokrov izveden z betonsko ploščo, nad katero se dviguje vzdrževalna (kontrolna) postaja, ki omogoča vstop v komoro s pomočjo jeklenih stopnic ali lestev.

3.3.3 Zračniki, oddušniki

Gibanje vodnih mas v vodostanu zahteva prost dostop do zraka, kar je omogočeno preko zračnikov ustreznih prečnih prerezov. Če je vodostan deloma vkopan v teren, deloma pa se komora vodostana dviguje nad okoliški teren, so ti nameščeni ob najvišjem delu zunanjih sten vodostana, vendar dovolj visoko, da onemogočajo vnos površinske vode, blata in ostalih delcev, ki bi kakorkoli ogrozili delovanje elektrarne. V alpskih predelih je potrebno upoštevati še pričakovano debelino snežne odeje, ki ne sme presegati spodnji rob zračnikov, ker bi s tem onemogočala prost dostop zraka do vodostanske komore. V teh predelih pa je posebno pozornost potrebno posvetiti umestitvi ob upoštevanju nevarnosti snežnih plazov. Če se umestitvi na ogroženih predelih ne moremo izogniti, se poslužujemo vodostanov, ki so v celoti vkopani v kamnini. V teh primerih so zračniki v pokrovu komore zavarovani z rešetkami ter žičnatimi mrežami.

3.3.4 Obloge vodostana

Na izvedbo ter izbiro obloge komor ter jaškov vplivajo enaki principi kot pri oblogah dovodnih rovov. Na izvedbo, nujnost le-te ter debelino vplivata nosilna kapaciteta ter prepustnost kamnin pri maksimalni polnitvi vodostana. Ker so posamezni deli vodostana izpostavljeni različnim tlačnim pogojem, je lahko obloga spremenljiva in se tem pogojem prilagaja, kljub visoki trdnosti okoliške kamnine.

3.3.5 Višina vodostana

Zgornji rob vodostanske komore mora biti najmanj 0,5 do 1,0 m višje od maksimalne pričakovane gladine vode v primeru kritična zaustavitve turbine.

3.4 Stabilnost vodostana

V objektu hidroelektrarne se nahaja posebni avtomatski regulator, ki skrbi, da sta frekvenca ter napetost električnega toka v omrežju čim bolj konstantni glede na spremembe v električnem omrežju zaradi zahtev porabnikov. Regulator tako ves čas delovanja hidroelektrarne uravnava pretok na turbine, kar povzroča oscilacije vodnih mas v vodostanu. Tem oscilacijam, katerih frekvenca je reda velikosti nekaj sekund, je potrebno posvetiti posebno pozornost, saj lahko v določenih situacijah pride do resonance oziroma stalnega povečevanja nihanja gladine v vodostanu. Potrebno je upoštevati posebne pogoje dimenzioniranja vodostana, ki zagotavljajo čim kvalitetnejše dušenje takšnih oscilacij oziroma njegovo stabilnost. Gre za t.i. Thomova kriterija: prvi določa minimalno vrednost površine horizontalnega preseka vodostana in mora biti izpolnjen po njegovi celotni višini, drugi omejuje velikost vsote energijskih izgub v dovodnem in tlačnem rovu (Đorđević, 1989):

$$1. \text{ Thomov kriterij: } S_{VOD} > \frac{1,15 \cdot L_D \cdot Q_{INST}^2}{2g \cdot S_D \cdot \Delta h_D \cdot (H_0 - \Delta h_D - 3 \cdot \Delta h_T)} \quad (5)$$

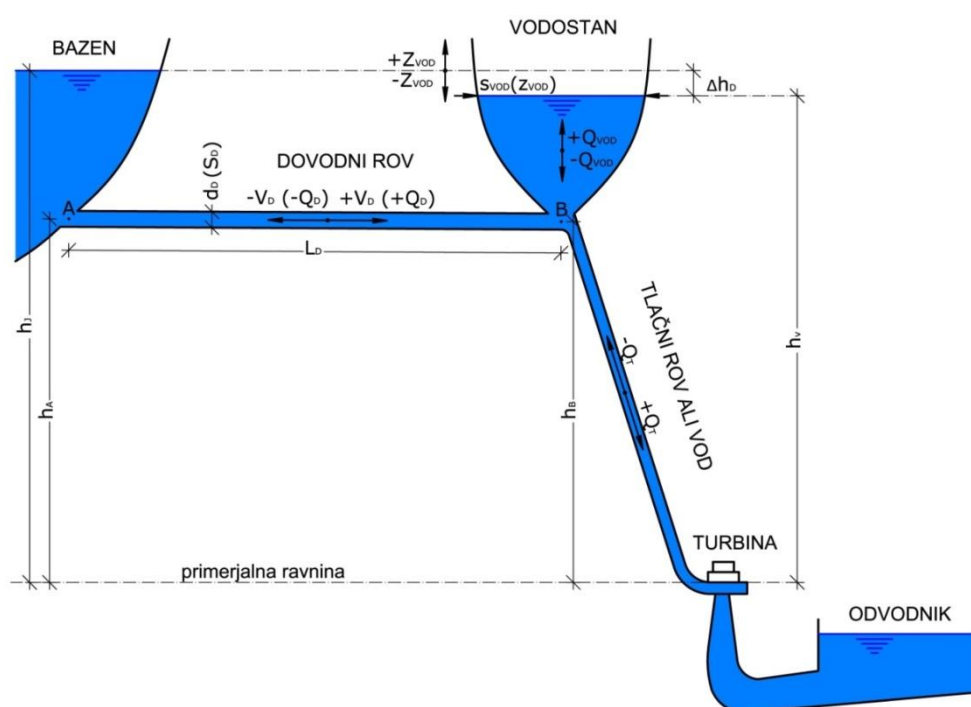
$$2. \text{ Thomov kriterij: } \Delta h_D + \Delta h_T < \frac{1}{3} H_0 \quad (6)$$

Δh_D je vrednost energijskih izgub v dovodnem rovu, Δh_T pa vrednost izgub v tlačnem rovu. H_0 predstavlja statični padeč vode in predstavlja višinsko razliko med gladino akumulacijskega jezera ter spodnjega odvodnika, zmanjšano za vrednost kinetične energije vodnega toka na

vtoku in iztoku. L_D označuje dolžino dovodnega rova, S_D pa njegovo površino. Vrednost 1,15 predstavlja varnostni faktor izračuna. Kriterij je primeren za vse vrste vodostanov, ki so izpostavljeni atmosferskim pritiskom (tudi za diferencialne vodostane, kjer se za površino upošteva vsota površin jaška in komore). Ne velja pa za zožanje v vodostan oziroma dotok v njega.

3.5 Izpeljava osnovnih enačb za enostavni vodostan

Izpeljava osnovnih enačb za enostavni vodostan v nadaljevanju je smiselno povzeta po učbeniku Hidravlika nestalnega toka (Rajar, 1980). Enostavni vodostan je vodostan brez komor, jaškov, preliva, dušilke in ni nujno cilindričen vodostan. Če ni cilindričen, moramo poznati funkcijo $S_{VOD}(Z_{VOD})$, ki nam razkriva površino horizontalnega prereza vodostana po njegovi celotni višini.



Slika 7: Osnovna shema derivacijske HE za izpeljavo osnovnih enačb

Hipoteze, ki jih upoštevamo v nadaljevanju izpeljave, so:

- stisljivost vode je zanemarljiva in pretok je v vseh prerezi dovodnega rova enak
- vztrajnost mase vode v vodostanu lahko glede na vztrajnost mase vode dovodnega rova zanemarimo
- manevri odpiranja in zapiranja se izvajajo tik pod vodostanom
- izgube v jašku vodostana ter kinetično energijo gladine v vodostanu lahko zanemarimo
- kota gladine jezera je nespremenljiva, navkljub nihanju gladine v vodostanu
- naklon dovodnega rova je majhen

3.5.1 Izpeljava dinamične enačbe

Ko teče voda po dovodnem rovu od akumulacijskega jezera proti vodostanu, lahko v primeru enakomernega gibanja uporabimo 2. Newtonov zakon, ki pravi:

$$\Sigma F = m \cdot a_D = \rho \cdot V \cdot a_D = \rho \cdot L_D \cdot S_D \cdot \frac{dV_D}{dT} \quad (7)$$

Rezultanto vseh sil, ki delujejo na vodo v dovodnem rovu, lahko oblikujemo iz spodnjih izrazov. Majhne naklone dovodnega rova lahko izrazimo na naslednji način:

$$I = \tan \theta \cong \sin \theta = \frac{h_A - h_B}{L_D} \quad (8)$$

Komponento teže vode v dovodnem rovu v smeri gibanja lahko s pomočjo naklona rova izrazimo z naslednjo enačbo:

$$F_G = F \cdot \sin \theta = \gamma \cdot V \cdot \sin \theta = \gamma \cdot S_D \cdot L_D \cdot I = \gamma \cdot S_D \cdot (h_A - h_B) \quad (9)$$

Silo zaradi pritiska vode lahko izvednotimo iz naslednjega izraza:

$$F_P = F_A - F_B - \gamma \cdot S_D \cdot R_{trenja} \quad (10)$$

Sile zaradi pritiskov na ploskev pri prerezu A:

$$F_A = \gamma \cdot S_D \cdot \left(h_J - h_A - R_{vtok} - \frac{V_D^2}{2g} \right) \quad (11)$$

Sile zaradi pritiskov na ploskev pri prerezu B:

$$F_B = \gamma \cdot S_D \cdot \left(h_J - h_B + Z_{VOD} - \frac{V_D^2}{2g} \right) \quad (12)$$

Energijske izgube v dovodnem rovu Δh_D so enake vsoti izgub na vtoku ter izgub zaradi trenja vode ob ostenje rova – linijske izgube. Če so v vodostan vgrajene tudi dušilke, je potrebno na tem mestu upoštevati tudi njihove izgube. V izrazu upoštevamo koeficient η oziroma t.i. karakteristiko rova:

$$\Delta h_D = R_{vtok} + R_{trenja} = \eta \cdot Q_D \cdot |Q_D| \quad (13)$$

Ker so izgube na vtoku minimalne jih lahko zanemarimo, izgube zaradi trenja ob ostenje rova pa lahko zapišemo z enačbo Darcy-Weissbacha, kjer koeficient λ predstavlja empirični brezdimenzijski koeficient trenja, ki se pri praktičnih računih giblje med vrednostima 0,02 ter 0,05. Tako lahko izgube dovodnega rova zapišemo v obliki:

$$\Delta h_D = \lambda \cdot \frac{L_D}{d_D} \cdot \frac{V_D^2}{2g} \quad (14)$$

Iz zgornjih dveh izrazov lahko izpeljemo enačbo karakteristike rova η :

$$\eta = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_D}{\Pi^2 \cdot g \cdot d_D^5} \quad (15)$$

Ob upoštevanju gornjih izrazov enačba sile zaradi pritiskov vode privzame naslednjo obliko:

$$F_p = -\gamma \cdot S_D \cdot (h_A - h_B) - \gamma \cdot S_D \cdot (Z_{VOD} + \Delta h_D) \quad (16)$$

Po izvrednotenju rezultante vseh sil, ki delujejo na vodo v dovodnem rovu, se Newtonov zakon preoblikuje:

$$\gamma \cdot S_D \cdot (h_A - h_B) - \gamma \cdot S_D \cdot (h_A - h_B) - \gamma \cdot S_D \cdot (Z_{VOD} + \Delta h_D) = \rho \cdot L_D \cdot S_D \cdot \frac{dV_D}{dT} \quad (17)$$

Tako dobimo dinamično enačbo za nestalni tok v dovodnem rovu:

$$\frac{L_D}{g \cdot S_D} \cdot \frac{dQ_D}{dT} + Z_{VOD} + \lambda \cdot \frac{L_D}{d_D} \cdot \frac{Q_D^2}{S_D^2 \cdot 2g} = 0 \quad (18)$$

3.5.2 Izpeljava kontinuitetne enačbe

Ob upoštevanju trditve, da je dotok do preseka B enak vsoti odtoka navzgor v vodostan in odtoka po tlačnem rovu oz. vodu proti turbinam, lahko izrazimo kontinuitetno enačbo za nestalni tok v dovodnem rovu:

$$Q_T + Q_{VOD} = Q_D \quad (19)$$

$$Q_T + V_{VOD} \cdot S_{VOD} = V_D \cdot S_D \quad (20)$$

$$Q_T + \frac{dZ_{VOD}}{dT} \cdot S_{VOD} = V_D \cdot S_D \quad (21)$$

3.5.3 Reševanje sistema enačb po tangentni metodi oz. t.i. računanje po korakih

Zanimata nas funkciji nihanja gladine vodostana $Z_{VOD}(T)$ ter pretoka v dovodnem rovu $Q_D(T)$. Izraza odvoda po času kot diferencialni enačbi preoblikujemo v diferenčni enačbi:

$$\frac{dZ_{VOD}}{dT} = \frac{Z_{VOD}(T + \Delta T) - Z_{VOD}(T)}{\Delta T} \quad (22)$$

$$\frac{dQ_D}{dT} = \frac{Q_D(T + \Delta T) - Q_D(T)}{\Delta T} \quad (23)$$

Vstavimo ju v dinamično ter kontinuitetno enačbo:

$$\frac{L_D}{g \cdot S_D} \cdot \frac{Q_D(T + \Delta T) - Q_D(T)}{\Delta T} + Z_{VOD}(T + \Delta T) + \eta \cdot Q_D(T) \cdot |Q_D(T)| = 0 \quad (24)$$

$$Q_T(T) + \frac{Z_{VOD}(T + \Delta T) - Z_{VOD}(T)}{\Delta T} \cdot S_{VOD} = Q_D(T) \quad (25)$$

Za računanje po korakih moramo samo še izraziti vrednosti v času $(T + \Delta T)$:

$$Z_{VOD}(T + \Delta T) = Z_{VOD}(T) + \frac{\Delta T}{S_{VOD}} \cdot (Q_D(T) - Q_T(T)) \quad (26)$$

$$Q_D(T + \Delta T) = Q_D(T) - \frac{g \cdot S_D \cdot \Delta T}{L_D} \cdot (Z_{VOD}(T + \Delta T) + \eta \cdot Q_D(T) \cdot |Q_D(T)|) \quad (27)$$

3.5.4 Začetni in robni pogoji sistema enačb

V času $T = 0$ (T_0) poznamo začetni pogoj. Gre za stacionarno stanje, ko se gladina vode v vodostanu ne spreminja in velja $Q_D = Q_T = Q_0$. Kontinuitetna enačba nam za T_0 ne pove nič razen tega, da je stanje stabilno oziroma, da gladina v vodostanu miruje ($Z_{VOD} = \text{konst.}$):

$$\frac{dZ_{VOD}}{dT} = 0 \quad (28)$$

Iz dinamične enačbe pa lahko izrazimo izgube v začetnem stacionarnem stanju:

$$Z_{VOD}(T = T_0) = -\eta \cdot Q_0 \cdot |Q_0| \quad (29)$$

$$\eta = \frac{h_J - h_V}{Q_0 \cdot |Q_0|} \quad (30)$$

Robni pogoj na levem robu nam predstavlja kota gladine v jezeru, na desnem robu pa podatek o pretoku v tlačnem rovu. Če je zapiranje trenutno, je $Q_T = 0$, če pa imamo linearno zapiranje v času T_1 , velja:

$$Q_T(T) = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) \quad (31)$$

Postopek reševanja po tangentni metodi poteka takole:

- 1 V času T poznamo Q_D in Z_{VOD} iz začetnih pogojev ali iz računa za prejšnji časovni korak.
- 2 V času $(T + \Delta T)$ izračunamo Q_D in Z_{VOD} iz preoblikovanih izrazov za dinamično in kontinuitetno enačbo, kjer za vrednosti Q_D in Z_{VOD} vzamemo vrednosti iz časa T .
- 3 Izračun ponavljamo glede na izbran časovni korak, ki mora biti zaradi prvega reda točnosti tangentne metode reda 0,1 do 1,0 s. Na območjih naglih sprememb preseka vodostana pa je potrebno uporabiti še manjše časovne intervale.

4 PROGRAMSKI PAKET VODOSTAN

Programski paket VODOSTAN je nastal v podjetju IBE v obdobju januar – april 1997, njegov avtor je dr. Andrej Širca (Širca, 1997). Paket štirih programov za račun masnih nihanj v vodostanih vsebuje dva glavna programa:

- **CHAMTANK** (ang. CHAMber surge TANK) za račun vodostanov klasične oblike (jašek, cilindrična zgornja in spodnja komora ter dušilka na dnu)

- **DIFFTANK** (ang. DIFFerential surge TANK) za račun čistih diferencialnih vodostanov z diferencialno komoro po celi višini (jašek in diferencialna komora)

ter dva pomožna programa, ki izhajata iz glavnih dveh ter predstavljata njuno modifikacijo:

- **CHAMTAM1** (ang. CHAMber surge TAnk Modification1) za račun klasičnih vodostanov z zgornjo prizmatično komoro (jašek, zgornja prizmatična komora, spodnja cilindrična komora, dušilka na dnu)
- **DICHTANK** (ang. Differential CHAMber surge TANK) za račun kombiniranih diferencialno – komornih vodostanov (jašek, zgornja diferencialna komora, spodnja klasična cilindrična komora, dušilka med spodnjo komoro in dovodnim rovom).

Vsi štirje programi delujejo v DOS okolju in so bili razviti v programskem jeziku FORTRAN. Izračun masnih nihanj vršijo s pomočjo tekstovne datoteke, ki vsebuje vrednosti vhodnih spremenljivk ter podatkov v predpisanem vrstnem redu. Po izračunu programi samostojno shranijo tekstovno datoteko z rezultati, ki ne omogoča njihove preglednosti in predstave. Program CHAMTANK je bil le grobo preverjen z rezultati programa M. Kryzka (Hidrotehnična smer FGG, Ljubljana) in I. Močnika (IBE, Ljubljana). Program DIFFTANK je bil preverjen z rezultati dveh podobnih programov (Singamsetti in Singh, 1980; Otter, 1988). Programa CHAMTAM1 ter DICHTANK nista bila preverjena, vendar se zaradi izhajanja iz glavnih dveh programov predvideva njuna zanesljivost. Noben izmed programov v času nastanka ni bil preverjen z meritvami na konkretnem objektu.

4.1 Posodobitev programskega paketa VODOSTAN

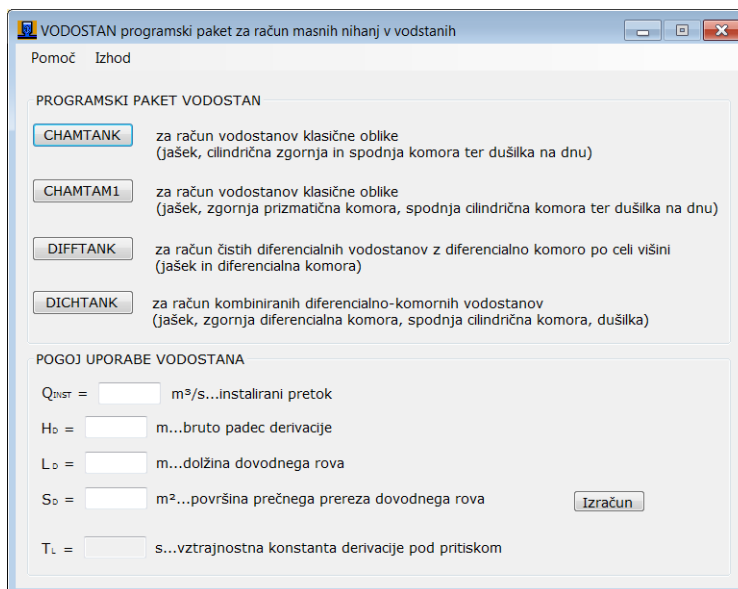
Izdelana je bila posodobitev programskega paketa s preglednim grafičnim okenskim vmesnikom s pomočjo Visual Basic-a Express 2010, ki omogoča uporabniku enostavnejši vnos podatkov in parametrov ter pregled izračunanih količin v obliki animacije za vse štiri zgoraj omenjene programe. Do paketa dostopamo s klikom na spodnjo ikono izvršljive .exe datoteke Vodostan velikosti 6,65 MB.



Slika 8: Ikona programskega paketa Vodostan

Uvodno okno programskega paketa omogoča dostop do štirih programov paketa (CHAMTANK, CHAMTAM1, DIFFTANK ter DICHTANK) s klikom na posamezen gumb z imenom programa. Na desni strani gumbov je dodan osnoven opis tipa vodostana. Potrebno je opozoriti, da vsi preračuni v programskem paketu delujejo z decimalnim simbolom pike. Privzet simbol pri nas je vejica, lahko pa ga spremenimo v Nadzorni plošči računalnika pod dodatnimi nastavitvami Regije in jezika. Omogočen je preračun vztrajnostne konstante derivacije pod pritiskom T_L , ki nam pogojuje uporabo vodostana. Za preračun je potrebno vnesti Q_{INST} - instalirani pretok v m^3/s , H_D – bruto padeč derivacije v m, L_D – dolžino dovodnega rova v m ter S_D – površino prečnega prereza dovodnega rova v m^2 ter klikniti na gumb *Preračun*. Predpostavljen je konstanten krožni ali pravokotni prerez dovodnega rova po njegovi celotni dolžini. Po kliku se izpiše vrednost vztrajnostne konstante ter prikaže opozorilno okno, ki nas obvesti ali je vodostan v sistemu derivacijske HE s podanimi

karakteristikami potreben ali ne. Opozorilno okno zapremo s klikom na gumb OK. Po izračunu ter spreminjanju vhodnih podatkov je možno preračun ponovno poganjati. Preračune masnih nihanj za posamezne vodostane je možno vršiti, kljub vrednosti vztrajnostne konstante, ki lahko nasprotuje uporabi vodostana v sistemu.



Slika 9: Uvodno okno programskega paketa VODOSTAN

S klikom na meni *Pomoč* → *O programu...* se nam odpre okno z osnovnimi informacijami o programu (avtorstvo, čas nastanka, namen programa). S klikom na meni *Izhod* zapiramo program.

Vsi štirje programi paketa so oblikovno identični, okno programov zapolnjujejo štirje zavihki:

- Vnos podatkov
- Parametri izračuna
- Rezultati
- Animacija

Vhodni podatki, ki jih mora uporabnik pred izračunom podati znotraj zavihkov *Vnos podatkov* ter *Parametri izračuna* so porazdeljeni v šest zaključenih sklopov, ki si logično sledijo:

1. Dovodni rov in bazen
2. Tlačni rov/vod
3. Karakteristike vode
4. Stabilnost vodostana
5. Vodostan
6. Parametri izračuna

Med vnosom podatkov si lahko pomagamo z dodatnimi informacijami, ki so dostopne s klikom na gumba ob opisu posameznega podatka ter grafičnim prikazom vodostana skupaj z oznakami določenih karakteristik. Po preračunu je omogočeno pregledovanje vseh rezultatov znotraj zavihka *Rezultati*. Na levi strani okna zavihka *Animacija* se po izračunu izriše podan vodostan z vodno gladino v merilu, na desni strani pa graf. Oba grafična elementa med animacijo prikazujeta časovno spremenljive količine oziroma rezultate preračuna, predvsem

pa omogočata nazoren pregled masnega nihanja. Poleg sodobnega grafičnega vmesnika ter animacije kot pregleda rezultatov je izvirnemu programu dodan še zgoraj opisan preračun vztrajnostne konstante derivacije, preračun stabilnosti vodostana ter prikaz rezultatov, ki določajo dimezije vodostana. Rezultate preračunov je možno tudi enostavno shraniti oziroma izvoziti v Excelovo datoteko.

4.2 Uporaba programov

V naslednjih poglavjih je obrazložena uporaba vseh 4 programov. Določeni koraki izračunov ter posamezni deli programov so med seboj identični. Zaradi preobsežnosti opisa identičnih korakov teh delov ne bom opisoval in so razloženi samo na primeru enega programa. Za preostale programe velja, da sledimo navodilom predhodno opisanih programov.

4.2.1 Uporaba programa CHAMTANK

Program je v osnovi razdeljen na dva sklopa, ki logično sledita drug drugemu. Pred izračunom masnih nihanj je potrebno vnesti podatke vodostana klasične oblike znotraj prvih dveh zavihkov *Vnos podatkov* ter *Parametri izračuna*. Po izračunu pa je možno pregledovati rezultate znotraj zavihkov *Rezultati* ter *Animacija*. V zavihku *Vnos podatkov* vnašamo podatke petih različnih sklopov v naslednjem vrstnem redu:

1. sklop: DOVODNI ROV IN BAZEN

- Q_{INST} : instalirani pretok v m^3/s
- L_D : dolžina dovodnega rova v m
- d_D : premer dovodnega rova v m
- Z_{BAZEN} : kota gladine v bazenu v m.n.v.
- Z_{ROVZG} : zgornja kota osi dovodnega rova v m.n.v.
- Z_{ROVSP} : spodnja kota osi dovodnega rova v m.n.v.
- n_{GDROV} : koeficient trenja dovodnega rova v $s/m^{1/3}$
- D_{DCEV} : debelina stene dovodnega rova v m
- E_{DCEV} : modul elastičnosti dovodnega rova v GN/m^2
- V_{HRAPD} : višina hrap dovodnega rova v mm

2. sklop: TLAČNI ROV/VOD

- L_T : dolžina tlačnega rova/voda v m
- d_T : premer tlačnega rova/voda v m
- n_{GTROV} : koeficient trenja tlačnega rova/voda v $s/m^{1/3}$
- D_{TCEV} : debelina stene tlačnega rova/voda v m
- E_{TCEV} : modul elastičnosti tlačnega rova/voda v GN/m^2
- V_{HRAPT} : višina hrap tlačnega rova/voda v mm
- Z_{ODVOD} : kota gladine odvoda vode v m.n.v.

3. sklop: KARAKTERISTIKE VODE

- ρ : gostota vode v kg/m^3
- K : modul stisljivosti vode v GN/m^2
- ν : kinematična viskoznost vode v m^2/s

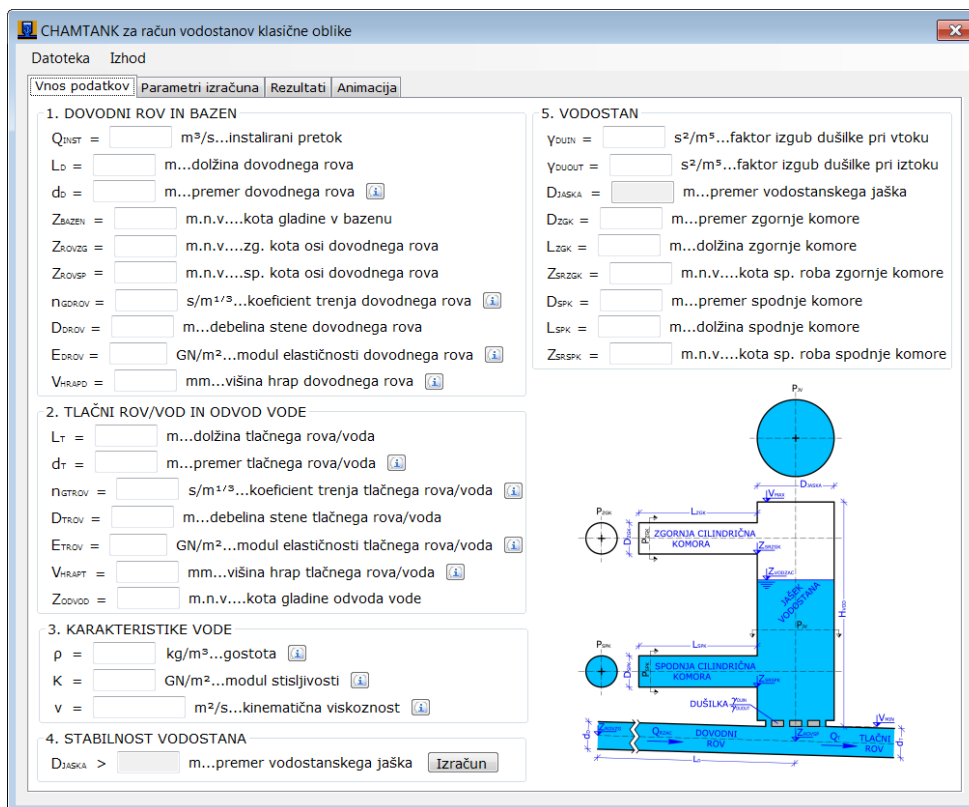
4. sklop: STABILNOST VODOSTANA

Potrebno je klikniti na gumb *Izračun* na desni strani, ki nam glede na podane podatke izračuna ustrezen premer vodostanskega jaška glede na 1. Thomov kriterij stabilnosti vodostana. Če 2. kriterij ni izpolnjen, se prikaže okno z opozorilom, da je potrebno vhodne podatke spremeniti. Po vsaki spremembi vhodnih podatkov znotraj prvih 4 sklopov je potrebno preračun vršiti vsakič znova, saj je nadaljnji prikaz rezultatov odvisen tudi od računa stabilnosti vodostana. Pred izračunom stabilnosti je polje D_{JASKA} v petem sklopu podatkov VODOSTAN onemogočeno za vpisovanje, po izračunu pa je možno ustrezen premer vpisati. Izračun masnih nihanj je mogoč tudi, če je premer jaška manjši od premera, določenega s kriterijem stabilnosti. Možen je tudi preračun masnih nihanj v enostavnem cilindričnem vodostanu brez komor (spodnje in zgornje), le spremenljivkam D_{ZGK} , L_{ZGK} , Z_{SRZGK} , D_{SPK} , L_{SPK} , Z_{SRSPK} je potrebno dodeliti vrednost 0. Izračun lahko vršimo tudi samo z zgornjo ali samo spodnjo komoro.

5. sklop: VODOSTAN

- Y_{DUIN} : faktor izgub dušilke pri vtoku v s^2/m^5
- Y_{DUOUT} : faktor izgub dušilke pri iztoku v s^2/m^5
- D_{JASKA} : premer vodostanskega jaška v m
- D_{ZGK} : premer zgornje komore v m
- L_{ZGK} : dolžina zgornje komore v m
- Z_{SRZGK} : kota spodnjega roba zgornje komore v m.n.v.
- D_{SPK} : premer spodnje komore v m
- L_{SPK} : dolžina spodnje komore v m
- Z_{SRSPK} : kota spodnjega roba spodnje komore v m.n.v.

Pri nekaterih podatkih se desno od njihovega opisa nahaja poseben gumb, ki odpira dodatne informacije o podani količini v posebnem oknu in omogoča uporabniku enostavnejšo uporabo programa. Tako so določeni: minimalni svetli premer, koeficienti trenja, moduli elastičnosti ter višina hrap dovodnih ter tlačnih rovov/vodov. Dostopne so tudi dodatne informacije o gostoti, stisljivosti in kinematični viskoznosti vode v odvisnosti od njene temperature.



Slika 10: Program CHAMTANK (zavihek Vnos podatkov)

Grafični prikaz vodostana klasične oblike je možno povečati s klikom na samo grafiko, ki nam prikazuje nekaj bistvenih podatkov za preračun. V grafiki so vidne tudi oznake V_{MAX} – kota pokrova vodostana v m.n.v., V_{MIN} – kota vtoka v vodostan v m.n.v. ter H_{VOD} – višina vodostana v m, ki so v programu izračunane ter prikazane šele po izračunu.

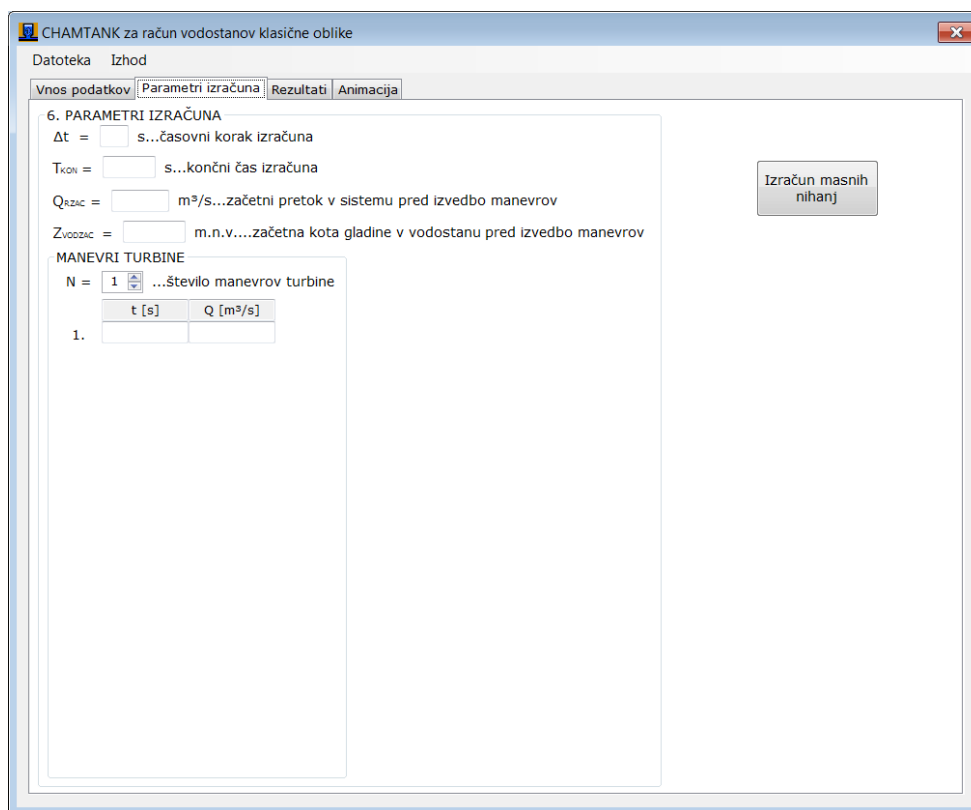
Po vnosu vseh podatkov znotraj petih sklopov je potrebno vnesti še parametre izračuna pod zavihkom *Parametri izračuna* v naslednjem vrstnem redu pod šestim sklopom podatkov:

6. sklop: PARAMETRI IZRAČUNA

- Δt : časovni korak izračuna v s
- T_{KON} : končni čas izračuna v s
- Q_{RZAC} : začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov v m^3/s
- Z_{VODZAC} : začetna kota gladine v vodostanu pred izvedbo manevrov v m.n.v.
- N : število manevrov turbine
- pari časov t v s ter pretokov Q v m^3/s proti turbini za posamezen manever turbine (vnašamo najmanj 2 manevra oziroma 2 para podatkov, ki nakazujeta manaver v začetnem času $T = 0$ ter še en poljuben manever), časi manevrov se vnašajo na 1 s natančno (v primeru neupoštevanju te omejitve se nam izpiše opozorilo in izvajanje programa se prekine)

Izračun masnih nihanj se vrši le za naslednje časovne korake izračuna: 0,1, 0,2, 0,5 ter 1,0 s ter končne čase, zaokrožene na 10 s natančno. Razlog zaokrožitve končnih časov je enotno izrisovanje grafov med samo animacijo. Prostor namenjen izrisovanju je omejen in le na ta

način je bilo možno s programiranjem doseči poenotenost izrisovanje za vse možne primere. Če nas zanimajo končni časi na 1 s natančno, izvedemo izračun z nekoliko daljšim končnim časom in opazujemo samo določen interval, ki nas zanima. V primeru, da uporabnik poda drugačne časovne parametre, se ob kliku *Izračun masnih nihanj* prikaže opozorilo, ki zahteva spremembo parametrov. Le ko jih uporabnik ustrezno popravi, se lahko izračun izvrši. Možno je podati do 20 različnih manevrov turbine.



Slika 11: Program CHAMTANK (zavihek Parametri izračuna)

Vhodne podatke z zavihkov *Vnos podatkov* ter *Parametri izračuna* je možno shraniti v tekstovno datoteko s končnico *.vod1* s klikom na meni *Datoteka* → *Shrani vhodne podatke*. Po kliku izberemo ime datoteke ter njeno mesto shranitve. Shranjene vhodne podatke lahko tudi odpiramo s klikom na meni *Datoteka* → *Odpri vhodne podatke* ter izbiro datoteke datoteke s končnico *.vod1*. Po uspešnem vnosu vseh vhodnih podatkov sledi izračun s klikom na gumb *Izračun masnih nihanj*. Preračun je neuspešen le v primerih, ko gladina vode v vodostanu preseže višino zgornjega roba zgornje cilindrične komore + 1 m ali pade pod višino spodnjega roba spodnje cilindrične komore – 1 m. Program nas na to opozori z opozorilom, da je potrebno vhodne podatke popraviti (predvsem sta mišljeni višini spodnjega roba zgornje ter spodnje komore). Gre za varovalki, ki preprečujeta, da bi prišlo do prostega prelivanja vode iz vodostana ali vstopa zraka v tlačni rov in s tem do nevarnosti podtlaka. V primeru uspešnega preračuna nas program opozori z obvestilom, da je se je izračun uspešno izvedel. Sledi pregled rezultatov znotraj zavihkov *Rezultati* ter *Animacija*.

Po uspešnem izračunu lahko pregledujemo rezultate v tabeli zavihka *Rezultati*, ki prikazujejo naslednje količine (na desni strani tabele se nahaja tudi LEGENDA REZULTATOV z opisom posamezne količine):

- T : čas simulacije v s
- V_D : hitrost toka v dovodnem rovu v m/s
- Z_{VOD} : denivelacija gladine v vodostanu glede na koto gladine v bazenu v m
- H_P : denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu v m
- Q_{VOD} : pretok v vodostanu v m^3/s
- Q_T : pretok v tlačnem rovu v m^3/s

Znotraj okvirja DIMENZIONIRANJE VODOSTANA so prikazani rezultati, ki določajo potreben obseg vodostana glede na preračun. Najpomembnejši rezultat je maksimalna kota gladine v vodostanu, na podlagi katere je določena kota pokrova vodostana ter njegova ustrezna višina. Velja, da je pokrov vodostana 1 m nad najvišjo gladino v njem, če le ta presega zgornji rob zgornje komore oziroma če ta ni dosežena, 1 m nad zgornjim robom zgornje komore. Prikazani so naslednji rezultati:

- $maxZ_{VOD}$: maksimalna kota gladine v vodostanu v m.n.v.
- $minZ_{VOD}$: minimalna kota gladine v vodostanu v m.n.v.
- V_{MAX} : kota pokrova vodostana v m.n.v.
- V_{MIN} : kota vtoka v vodostan v m.n.v.
- H_{VOD} : ustrezna višina vodostana v m

Prikazani so tudi dodatni rezultati glede na podan instalirani pretok Q_{INST} (vnešen v 1. sklopu podatkov zavihka *Vnos podatkov*) v naslednjem vrstnem redu:

- hitrost udarnega vala v dovodnem rovu v m/s
- trenje λ v dovodnem rovu na podlagi koeficienta trenja dovodnega rova n_{GDROV} (gre za začetni koeficient trenja λ_Z)
- trenja λ v dovodnem rovu na podlagi Reynoldsovega števila Re (gre za končni koeficient trenja λ_k , izračunan s postopkom bisekcije)
- izgube v dovodnem rovu na podlagi $\lambda(Re)$ (gre za vrednost Δh_D)
- hitrost udarnega vala v tlačnem rovu v m/s
- trenje λ v tlačnem rovu na podlagi koeficienta trenja tlačnega rova n_{GTROV} (gre za začetni koeficient trenja λ_Z)
- trenja λ v tlačnem rovu na podlagi Reynoldsovega števila Re (gre za končni koeficient trenja λ_k , izračunan s postopkom bisekcije)
- izgube v tlačnem rovu na podlagi $\lambda(Re)$ (gre za vrednost Δh_T)

Rezultate je možno shraniti v tekstovno ali Excel datoteko s klikom na meni *Datoteka* → *Shrani rezultate v...* → *tekstovno datoteko/Excel datoteko*. Za tekstovno datoteko s končnico .vod1 je potrebno izbrati ime ter njeno mesto shranitve. Enako velja za shranjevanje rezultatov v Excel datoteko.

CHAMTANK za račun vodostanov klasične oblike

Datoteka Izhod

Vnos podatkov	Parametri izračuna	Rezultati	Animacija		
T	Vd	Zvod	Hp	Qvod	Qt
0	3.71	-5.08	-5.08	0	0
1	3.7	-4.34	-0.42	70	0
2	3.68	-3.61	0.28	69.7	0
3	3.66	-2.88	0.97	69.4	0
4	3.64	-2.15	1.66	69	0
5	3.61	-1.43	2.33	68.6	0
6	3.58	-0.72	3	68.1	0
7	3.56	0	3.65	67.6	0
8	3.52	0.7	4.3	67	0
9	3.49	0.75	4.28	66.5	0
10	3.46	0.79	4.25	65.8	0
11	3.42	0.83	4.23	65.2	0
12	3.39	0.87	4.21	64.6	0
13	3.36	0.91	4.18	64	0
14	3.33	0.95	4.16	63.3	0
15	3.3	0.99	4.14	62.7	0
16	3.27	1.03	4.12	62.2	0
17	3.23	1.06	4.1	61.6	0
18	3.2	1.1	4.08	61	0
19	3.17	1.13	4.06	60.4	0
20	3.14	1.17	4.04	59.9	0
21	3.12	1.2	4.02	59.3	0
22	3.09	1.24	4	58.7	0
23	3.06	1.27	3.98	58.2	0
24	3.03	1.3	3.96	57.7	0
25	3	1.33	3.94	57.1	0
26	2.97	1.36	3.93	56.6	0
27	2.95	1.39	3.91	56.1	0
28	2.92	1.43	3.9	55.6	0
29	2.89	1.46	3.88	55.1	0
30	2.87	1.48	3.87	54.5	0
31	2.84	1.51	3.85	54	0
32	2.81	1.54	3.84	53.6	0

LEGENDA REZULTATOV

T - čas simulacije [s]
 V_D - hitrost toka v dovodnem rovu [m/s]
 Z_{VOD} - denivelacija gladine v vodostanu glede na koto gladine v bazenu [m]
 H_P - denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu [m]
 Q_{VOD} - pretok v vodostanu [m³/s]
 Q_T - pretok v tlačnem rovu [m³/s]

DIMENZIONIRANJE VODOSTANA

$maxZ_{VOD} = 530.12$ m.n.v....max. kota gladine v vodostanu
 $minZ_{VOD} = 520.92$ m.n.v....min. kota gladine v vodostanu
 $V_{MAX} = 531.12$ m.n.v....kota pokrova vodostana
 $V_{MIN} = 493.45$ m.n.v....kota vtoka v vodostan
 $H_{VOD} = 37.67$ m...ustrezna višina vodostana

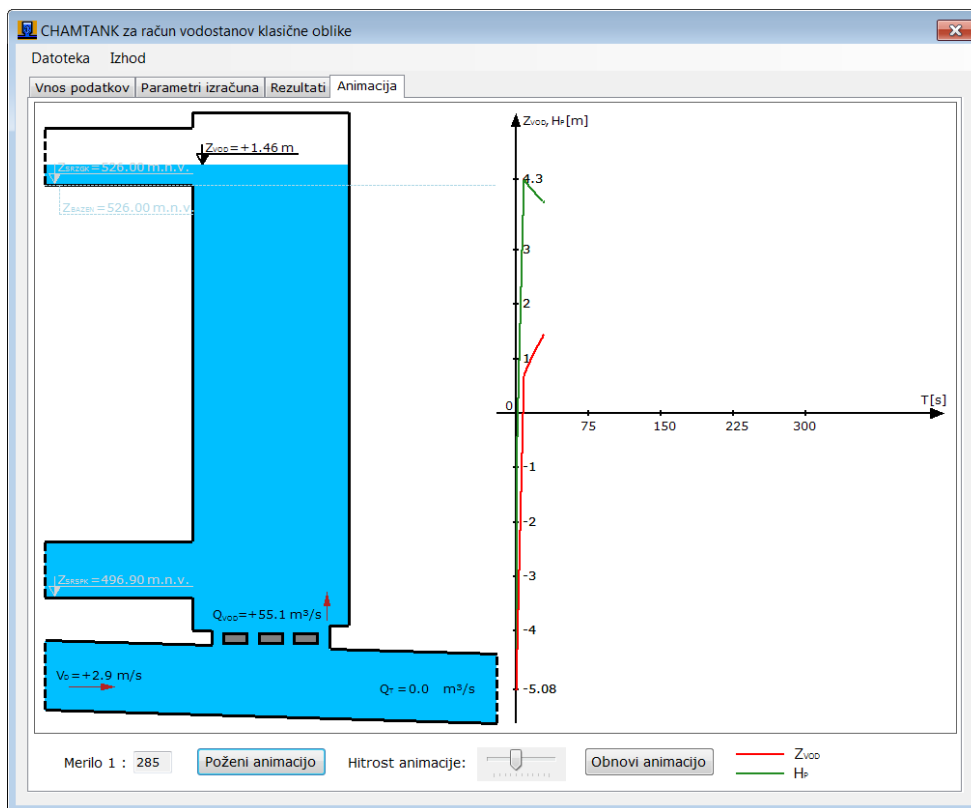
DODATNI REZULTATI GLEDE NA INSTALIRANI PRETOK

Hitrost udarnega vala v dovodnem rovu = 1017.10 m/s
Trenje v dovodnem rovu (λ) na podlagi $n_{DPROV} = 0.01240$
Trenje v dovodnem rovu (λ) na podlagi $Re = 0.01385$
Izgube v dovodnem rovu na podlagi λ (Re) = 5.08 m
Hitrost udarnega vala v tlačnem rovu = 1017.10 m/s
Trenje v tlačnem rovu (λ) na podlagi $n_{TPROV} = 0.01240$
Trenje v tlačnem rovu (λ) na podlagi $Re = 0.01385$
Izgube v tlačnem rovu na podlagi λ (Re) = 5.08 m

Slika 12: Program CHAMTANK (zavihek Rezultati)

Pod zavihkom Animacija se nam glede na podane podatke po izračunu na levi strani izriše vodostan v merilu, ki je izpisano v levem spodnjem kotu. Grafični prikaz v merilu prikazuje stik dovodnega ter tlačnega rova podanega premera, širino ter višino vodostanskega jaška (za primere, kjer širina jaška v določenem merilu presega velikost območja za izris, so zunanje linije izrisane črtkano in gre samo za shematičen prikaz, ki se od dejanskega stanja razlikuje), dušilko (grafični prikaz dušilke se v primeru, da je izguba dušilke pri vtoku in iztoku enaka 0 ne izriše) ter položaj in obliko obeh cilindričnih komor (v primeru enostavnega cilindričnega vodostana brez komor se komori ne izrišeta ipd. za primere vodostanov s samo spodnjo ali zgornjo komoro). Ker so dolžine komor dimenzijsko veliko večje od ostalih geometrijskih količin vodostana, bi jih bilo v merilu nesmiselno prikazovati. Zato se v grafiki izrisuje samo njun začetni del. Nadaljevanje komor v horizontalni smeri pa nakazujejo črtkane črte. Višinsko sta označena spodnja robova obeh komor Z_{SRZGK} , Z_{SRSPK} ter gladina vode v bazenu Z_{BAZEN} . Znotraj grafike so prikazane tudi naslednje količine rezultatov preračuna za čas $T = 0$: hitrost toka v dovodnem rovu V_D , denivelacija gladine v vodostanu glede na koto gladine v bazenu Z_{VOD} , pretok v vodostanu Q_{VOD} in pretok v tlačnem rovu Q_T , ki se med animacijo količinsko spreminjata. Na desni strani se izrišeta x-os, ki med animacijo prikazuje čas T v s ter y-os, ki prikazuje, kako se s časom spreminjata denivelacija gladine v vodostanu glede na koto gladine v bazenu Z_{VOD} (rdeča črta) ter denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu H_P (zeleno črta) v m. Pred poganjanjem animacije je potrebno z drsnikom določiti hitrost animacije (lahko ga pustimo tudi v začetnem položaju za najpočasnejšo hitrost animacije), animacijo pa poženemo s klikom na gumb *Poženi animacijo*. Med animacijo se prikazuje spreminjanje preračunanih količin skupaj z nihanjem gladine v vodostanu. Denivelaciji gladine ter tlaka se posebej izrisujeta v grafu vse do končnega časa izračuna. Ko se animacija ustavi, jo lahko povrnemo v začetno stanje s

klikom na gumb *Obnovi animacijo*. Tako jo lahko poganjamo večkrat z različnimi nastavitvami hitrosti.



Slika 13: Program CHAMTANK (zavihek Animacija)

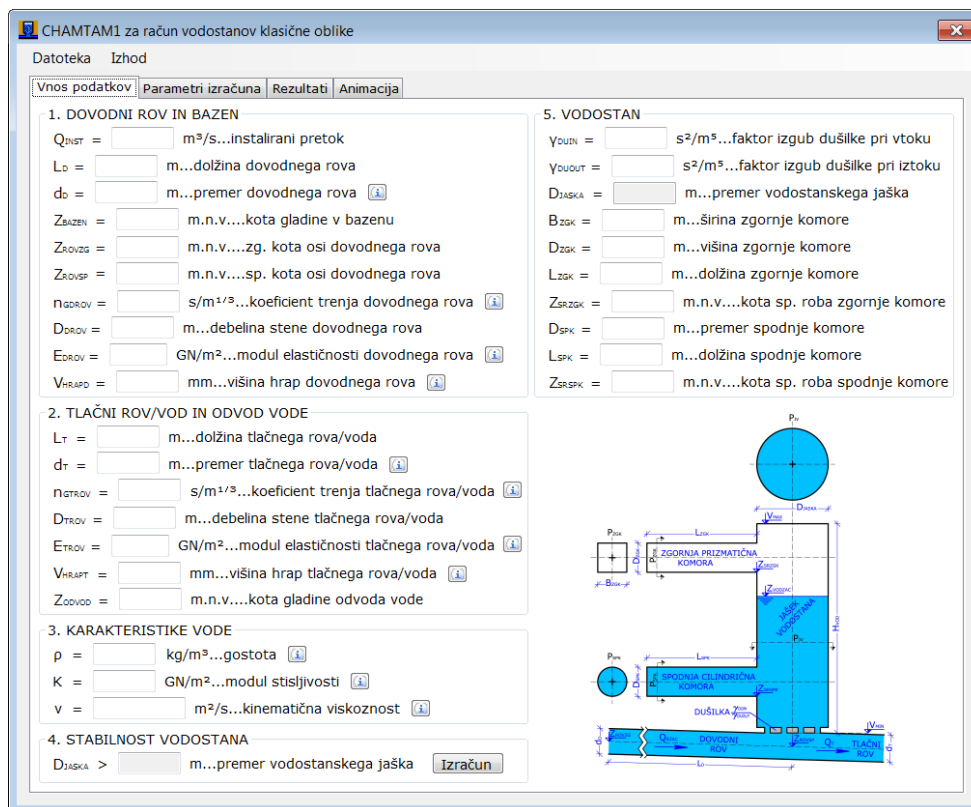
S klikom na meni *Datoteka* → *Nova* izbrisemo vse vhodne podatke ter rezultate preračunanega primera masnih nihanj in lahko začnemo s preračunom novega primera. S klikom na meni *Izhod* zapiramo program.

4.2.2 Uporaba programa CHAMTAM1

Program CHAMTAM1 v osnovi izhaja iz programa CHAMTANK in se razlikuje od njega le v obliki zgornje komore, ki je prizmatične oblike. Tako je edina sprememba pri izvajanju programa vnos podatkov v 5. sklopu VODOSTAN, kjer namesto premera zgornje komore podajamo naslednja dva podatka:

- B_{ZGK} : širina zgornje komore v m
- D_{ZGK} : višina zgornje komore v m

Tako kot že s programom CHAMTANK je tudi s programom CHAMTAM1 možen preračun masnih nihanj v enostavnem cilindričnem vodostanu brez komor (spodnje in zgornje), le naslednjim B_{ZGK} , D_{ZGK} , L_{ZGK} , Z_{SRZGK} , D_{SPK} , L_{SPK} , Z_{SRSPK} je potrebno dodeliti vrednost 0.



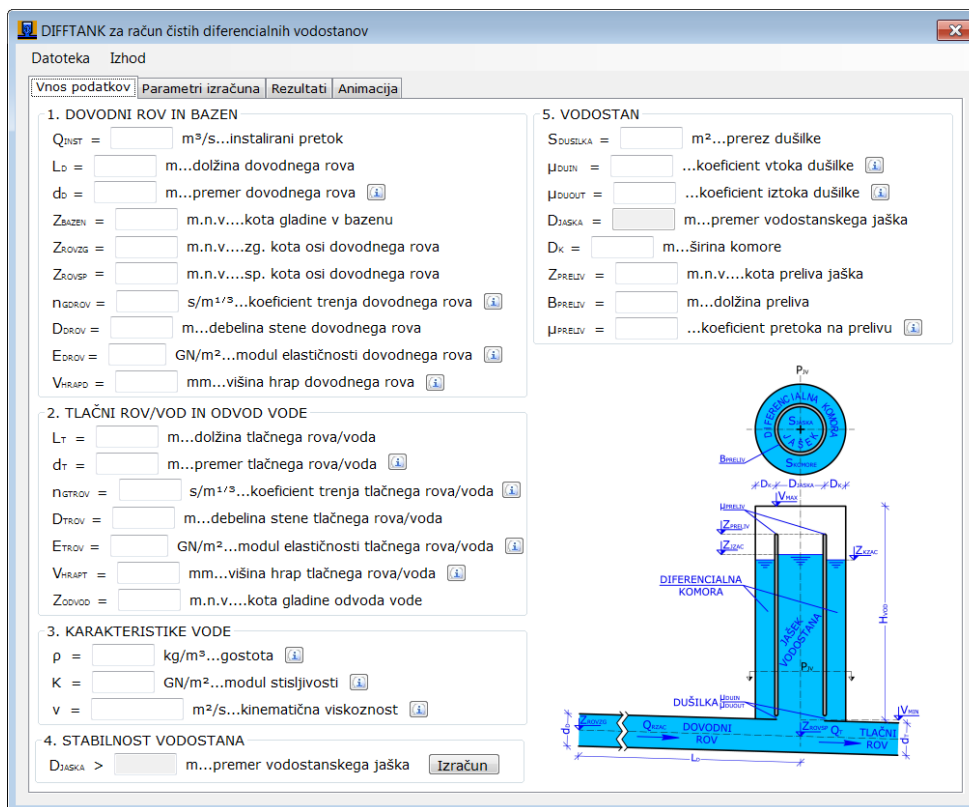
Slika 14: Program CHAMTAM1 (zavihek Vnos podatkov)

Omogočeno je shranjevanje, odpiranje vhodnih podatkov ter shranjevanje rezultatov v tekstovne datoteke tipa .vod2. Preostali elementi programa so identični programu CHAMTANK in nadaljnega opisa ter obrazložitve ne potrebujejo. Za izvajanje programa sledimo navodilom predhodnega programa.

4.2.3 Uporaba programa DIFFTANK

Prvi štirje sklopi podatkov, potrebnih za izračun masnih nihanj čistega diferencialnega vodostana, so identični kot že v predhodno opisanih programih. V petem sklopu VODOSTAN pa podajamo naslednje podatke:

- $S_{DUSILKA}$: prerez dušilke v m^2
- μ_{DUIN} : koeficient vtoka dušilke
- μ_{DUOUT} : koeficient iztoka dušilke
- D_{JASKA} : premer vodostanskega jaška v m
- D_K : širina komore v m
- Z_{PRELIV} : kota preliva jaška v m.n.v.
- B_{PRELIV} : dolžina preliva v m
- μ_{PRELIV} : koeficient pretoka na prelivu

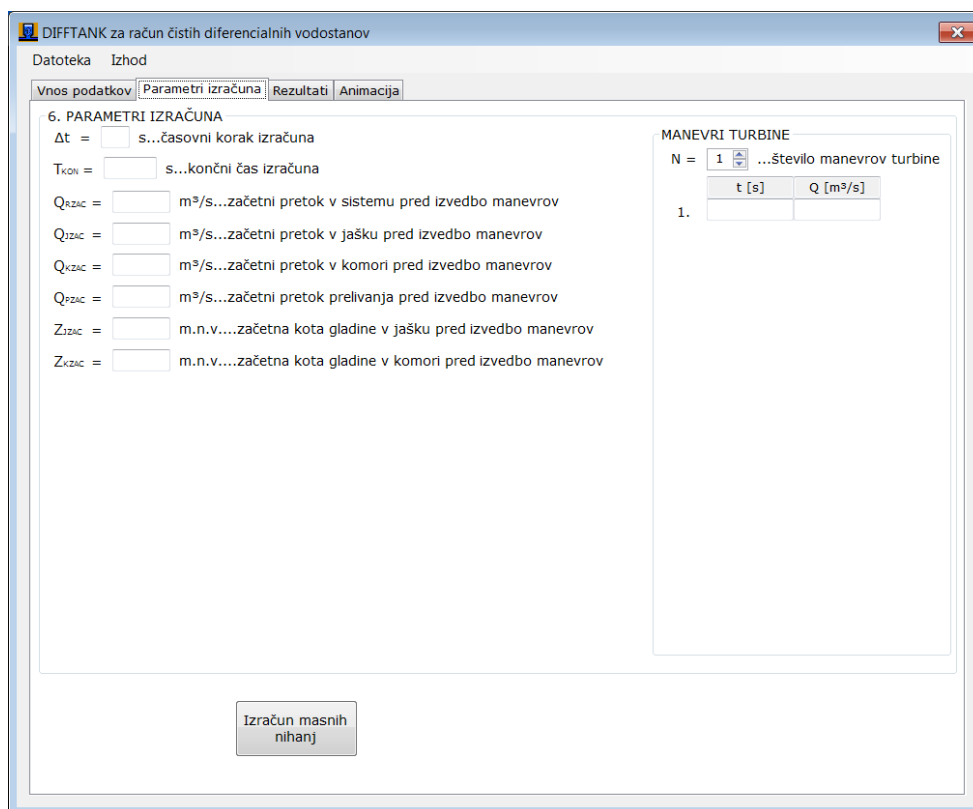


Slika 15: Program DIFFTANK (zavihek Vnos podatkov)

Poleg že predhodno opisanih dodatnih informacij so dostopne tudi informacije o koeficientu dušilke ter pretoka na prelivu.

Pred izračunom v šestem sklopu PARAMETRI IZRAČUNA podajamo še naslednje podatke:

- Δt : časovni korak izračuna
- T_{KON} : končni čas izračuna v s
- Q_{RZAC} : začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov v m^3/s
- Q_{JZAC} : začetni pretok v jašku pred izvedbo manevrov v m^3/s
- Q_{KZAC} : začetni pretok v komori pred izvedbo manevrov v m^3/s
- Q_{PZAC} : začetni pretok prelivanja pred izvedbo manevrov v m^3/s
- Z_{JZAC} : začetna kota gladine v jašku pred izvedbo manevrov v m.n.v.
- Z_{KZAC} : začetna kota gladine v komori pred izvedbo manevrov v m.n.v.
- N : število manevrov turbine
- pari časov t v s ter pretokov Q v m^3/s proti turbini za posamezen manever turbine



Slika 16: Program DIFFTANK (zavihek Parametri izračuna)

Po uspešnem izračunu lahko pregledujemo rezultate v tabeli zavihka *Rezultati*, ki prikazujejo naslednje količine:

- T : čas simulacije v s
- V_D : hitrost toka v dovodnem rovu v m/s
- Q_J : pretok po jašku v m^3/s
- Q_K : pretok v komoro v m^3/s
- Q_P : pretok preko preliva v m^3/s
- Z_J : denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu v m
- Z_K : denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu v m
- Q_T : pretok v tlačnem rovu v m^3/s

Znotraj okvirja DIMENZIONIRANJE VODOSTANA so prikazani rezultati, ki določajo potreben obseg vodostana glede na preračun. Najpomembnejši rezultat je maksimalna koto gladine v vodostanu, na podlagi katere je določena koto pokrova vodostana ter njegova ustrezna višina. Velja da je pokrov vodostana 1 m nad najvišjo gladino v njem, če le ta presega koto preliva oziroma če ta ni dosežena, 1 m nad koto preliva.

DIFFTANK za račun čistih diferencialnih vodostanov

Datoteka Izhod

Vnos podatkov	Parametri izračuna	Rezultati	Animacija				
T	Vd	Qj	Qk	Qp	Zj	Zk	Qt
0	3.7	0	0	0	-5.08	-5.08	0
1	3.7	70	0	0	-4.34	-5.07	0
2	3.7	66.1	3.8	0	-3.65	-5.07	0
3	3.7	64.6	5.3	0	-2.97	-5.06	0
4	3.7	63.3	6.4	0	-2.3	-5.04	0
5	3.7	62.1	7.3	0	-1.65	-5.03	0
6	3.7	61.1	8.2	0	-1.01	-5.02	0
7	3.7	60.1	8.9	0	-0.37	-5	0
8	3.6	59.1	9.5	0	0.25	-4.98	0
9	3.6	58.1	10.1	0	0.86	-4.97	0
10	3.6	57.1	10.7	0	1.46	-4.95	0
11	3.6	56.2	11.2	0	2.05	-4.93	0
12	3.5	55.2	11.7	0	2.63	-4.91	0
13	3.5	54.2	12.2	0	3.2	-4.89	0
14	3.5	53.2	12.6	8.2	3.68	-4.85	0
15	3.5	52.3	13	37.9	3.83	-4.77	0
16	3.4	51.6	13.1	49.7	3.85	-4.67	0
17	3.4	51	13	50.9	3.85	-4.56	0
18	3.4	50.5	12.9	50.6	3.85	-4.46	0
19	3.3	50	12.8	50.1	3.85	-4.36	0
20	3.3	49.5	12.8	49.6	3.85	-4.26	0
21	3.3	49.1	12.7	49.1	3.85	-4.15	0
22	3.2	48.6	12.6	48.6	3.85	-4.05	0
23	3.2	48.1	12.5	48.1	3.85	-3.96	0
24	3.2	47.6	12.4	47.7	3.84	-3.86	0
25	3.2	47.1	12.4	47.2	3.84	-3.76	0
26	3.1	46.7	12.3	46.7	3.84	-3.66	0
27	3.1	46.2	12.2	46.3	3.84	-3.57	0
28	3.1	45.8	12.1	45.8	3.84	-3.47	0
29	3	45.3	12.1	45.4	3.84	-3.38	0
30	3	44.9	12	44.9	3.84	-3.29	0
31	3	44.4	11.9	44.5	3.84	-3.19	0
32	3	44	11.8	44.1	3.84	-3.1	0

LEGENDA REZULTATOV

- T - čas simulacije [s]
- V_D - hitrost toka v dovodnem rovu [m/s]
- Q_J - pretok po jašku [m³/s]
- Q_K - pretok v komoro [m³/s]
- Q_P - pretok preko preлива [m³/s]
- Z_J - denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu [m]
- Z_K - denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu [m]
- Q_T - pretok v tlačnem rovu [m³/s]

DIMENZIONIRANJE VODOSTANA

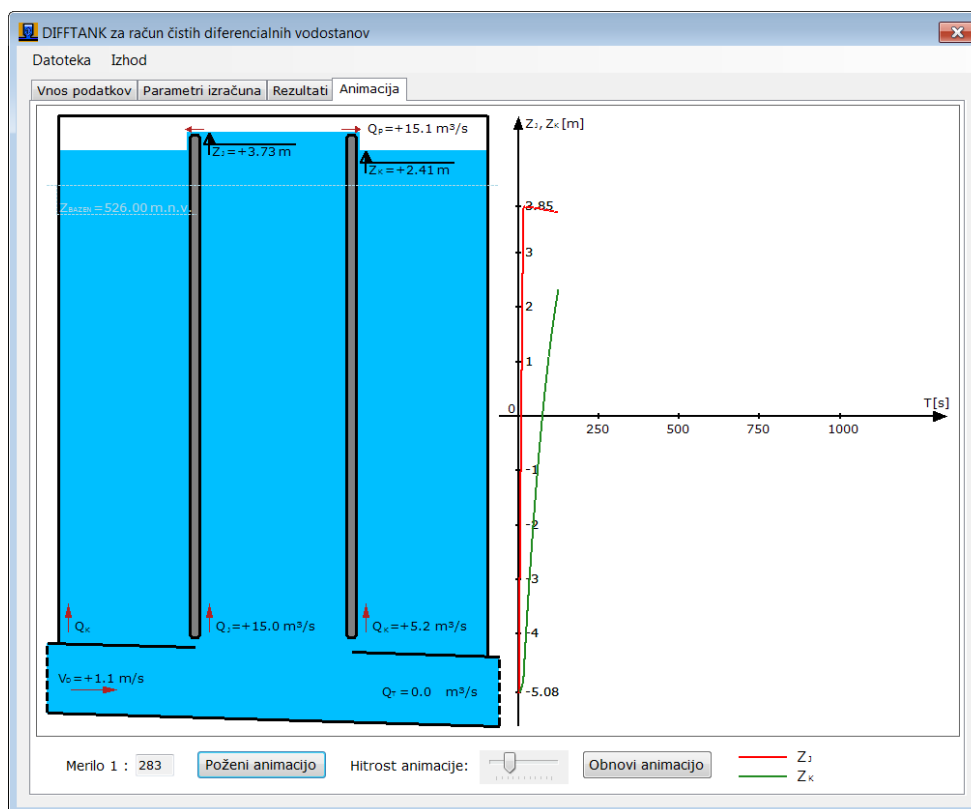
max Z_{VOD} = 529.85 m.n.v....max. kota gladine v vodostanu
min Z_{VOD} = 520.92 m.n.v....min. kota gladine v vodostanu
 V_{MAX} = 530.85 m.n.v....kota pokrova vodostana
 V_{MIN} = 493.45 m.n.v....kota vtoka v vodostan
 H_{VOD} = 37.40 m...ustrezna višina vodostana

DODATNI REZULTATI GLEDE NA INSTALIRANI PRETOK

Hitrost udarnega vala v dovodnem rovu = 1017.10 m/s
Trenje v dovodnem rovu (λ) na podlagi n_{GRROV} = 0.01240
Trenje v dovodnem rovu (λ) na podlagi Re = 0.01385
Izgube v dovodnem rovu na podlagi λ (Re) = 5.08 m
Hitrost udarnega vala v tlačnem rovu = 1017.10 m/s
Trenje v tlačnem rovu (λ) na podlagi n_{GRROV} = 0.01240
Trenje v tlačnem rovu (λ) na podlagi Re = 0.01385
Izgube v tlačnem rovu na podlagi λ (Re) = 5.08 m

Slika 17: Program DIFFTANK (zavihek Rezultati)

Pod zavihkom Animacija se nam glede na podane podatke po izračuni na levi strani izriše vodostan v merilu, ki je izpisano v levem spodnjem kotu. Grafični prikaz v merilu prikazuje stik dovodnega ter tlačnega rova podanega premera in širino ter višino vodostanskega jaška s komoro ter dušilko (grafični prikaz dušilke se v primeru, da je koeficient iztoka in vtoka dušilke enak 0 ne izriše). V določenih primerih širina jaška ter komore v merilu presega območje izrisa same grafike. Nadaljevanje komore v horizontalni smeri v takšnih primerih nakazujejo črtkane črte, vsi rezultati izračuna pa so vseeno nazorno prikazani. Višinsko je označena gladina vode v bazenu Z_{BAZEN} . Znotraj grafike so prikazane tudi naslednje količine rezultatov preračuna za čas $T = 0$: hitrost toka v dovodnem rovu V_D , denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu Z_J , denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu Z_K , pretok v jašku Q_J , pretok v komori Q_K , pretok preko preлива Q_P in pretok v tlačnem rovu Q_T , ki se med animacijo količinsko spreminjajo. Na desni strani se izrišeta x-os, ki med animacijo prikazuje čas T v s ter y-os, ki prikazuje, kako se s časom spreminjata denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu Z_J (rdeča črta) ter denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu Z_K (zelena črta) v m.

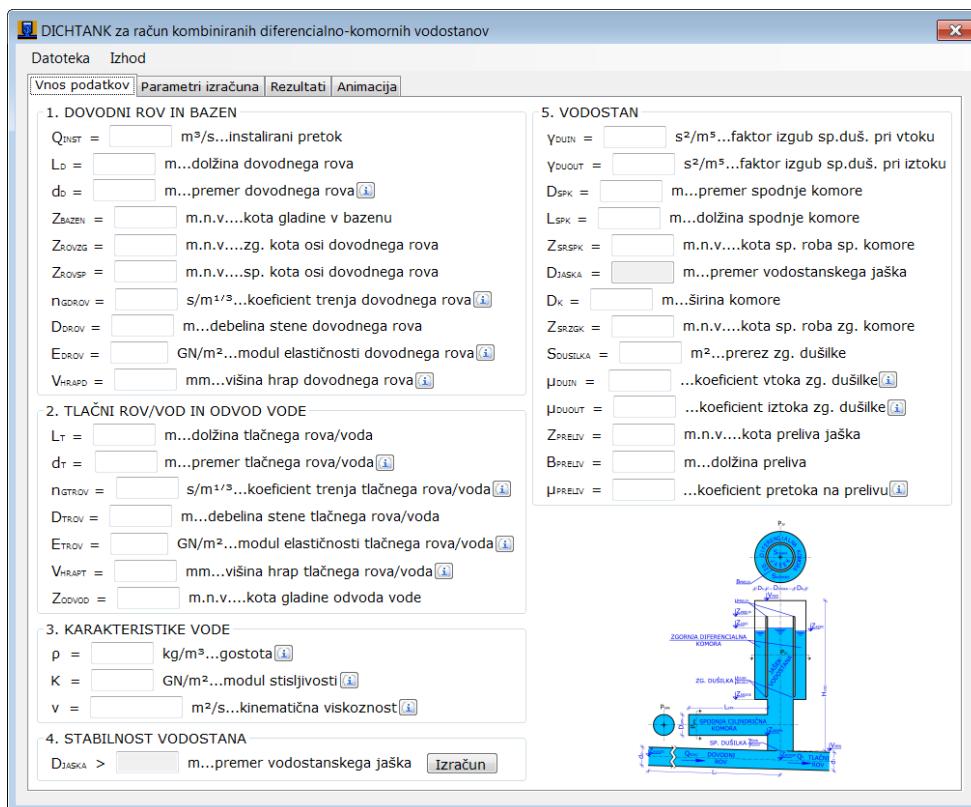


Slika 18: Program DIFFTANK (zavihek Animacija)

4.2.4 Uporaba programa DIGHTANK

Prvi štirje sklopi podatkov, potrebnih za izračun masnih nihanj čistega diferencialnega vodostana, so identični kot že v predhodno opisanih programih. V petem sklopu VODOSTAN pa podajamo naslednje podatke:

- γ_{DUIN} : faktor izgub dušilke pri vtoku v s^2/m^5
- γ_{DUOUT} : faktor izgub dušilke pri iztoku v s^2/m^5
- D_{SPK} : premer spodnje komore v m
- L_{SPK} : dolžina spodnje komore v m
- Z_{SRSPK} : kota spodnjega roba spodnje komore v m.n.v.
- D_{JASKA} : premer vodostanskega jaška v m
- D_K : širina komore v m
- Z_{SRZGK} : kota spodnjega roba zgornje komore v m.n.v.
- $S_{DUSILKA}$: prerez dušilke v m^2
- μ_{DUIN} : koeficient vtoka dušilke
- μ_{DUOUT} : koeficient iztoka dušilke
- D_{JASKA} : premer vodostanskega jaška v m
- Z_{PRELIV} : kota preliva jaška v m.n.v.
- B_{PRELIV} : dolžina preliva v m
- μ_{PRELIV} : koeficient pretoka na prelivu



Slika 19: Program DIGHTANK (zavihek Vnos podatkov)

Po uspešnem izračunu lahko pregledujemo rezultate v tabeli zavihka *Rezultati*, ki prikazujejo naslednje količine:

- T : čas simulacije v s
- V_D : hitrost toka v dovodnem rovu v m/s
- Q_J : pretok po jaški v m^3/s
- Q_K : pretok v komoro v m^3/s
- Q_P : pretok preko preliva v m^3/s
- Z_J : denivelacija gladine v jaški glede na koto gladine v bazenu v m
- Z_K : denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu v m
- H_P : denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu v m
- Q_T : pretok v tlačnem rovu v m^3/s

DIGHTANK za račun kombiniranih diferencialno-komornih vodostanov

Datoteka Izhod

Vnos podatkov	Parametri izračuna	Rezultati	Animacija					
T	Vd	Qj	Qk	Qp	Zj	Zk	Hp	Qt
0	3.71	0	0	0	-5.08	-5.08	-5.08	70
1	3.7	18.7	0	0	-4.93	-1	-4.93	51.3
2	3.7	37.3	0	0	-4.62	-1	-4.35	32.7
3	3.7	55.9	0	0	-4.17	-1	-3.06	14
4	3.7	57	0	0	-3.71	-1	-1.21	12.6
5	3.7	58.1	0	0	-3.23	-1	-0.63	11.2
6	3.7	59.2	0	0	-2.75	-1	-0.05	9.8
7	3.6	60.2	0	0	-2.26	-1	0.55	8.4
8	3.6	61.2	0	0	-1.76	-1	1.14	7
9	3.6	62.2	0	0	-1.25	-1	1.75	5.6
10	3.6	63.1	0	0	-0.74	-1	2.36	4.2
11	3.5	64	0	0	-0.22	-1	2.97	2.8
12	3.5	64.9	0	0	0.31	-1	3.59	1.4
13	3.5	65.7	0	0	0.85	-1	4.21	0
14	3.4	65	0	0	1.38	-1	4.83	0
15	3.4	64.4	0	0	1.9	-1	5.28	0
16	3.4	63.7	0	0	2.42	-1	5.74	0
17	3.3	63	0	0	2.93	-1	6.18	0
18	3.3	62.2	0	0	3.44	-1	6.61	0
19	3.3	61.5	0	0	3.94	-1	7.04	0
20	3.2	60.7	0	30.1	4.19	-0.97	7.21	0
21	3.2	59.9	0	58.4	4.2	-0.9	7.15	0
22	3.1	59.1	0	59.1	4.2	-0.83	7.07	0
23	3.1	58.3	0	58.3	4.2	-0.77	7	0
24	3.1	57.6	0	57.5	4.2	-0.7	6.93	0
25	3	56.8	0	56.8	4.2	-0.64	6.86	0
26	3	56.1	0	56.1	4.2	-0.57	6.79	0
27	2.9	55.4	0	55.4	4.2	-0.51	6.72	0
28	2.9	54.7	0	54.7	4.2	-0.45	6.66	0
29	2.9	54	0	54	4.2	-0.39	6.6	0
30	2.8	53.3	0	53.3	4.2	-0.33	6.53	0
31	2.8	52.6	0	52.6	4.2	-0.27	6.48	0
32	2.8	51.9	0	51.9	4.2	-0.21	6.42	0

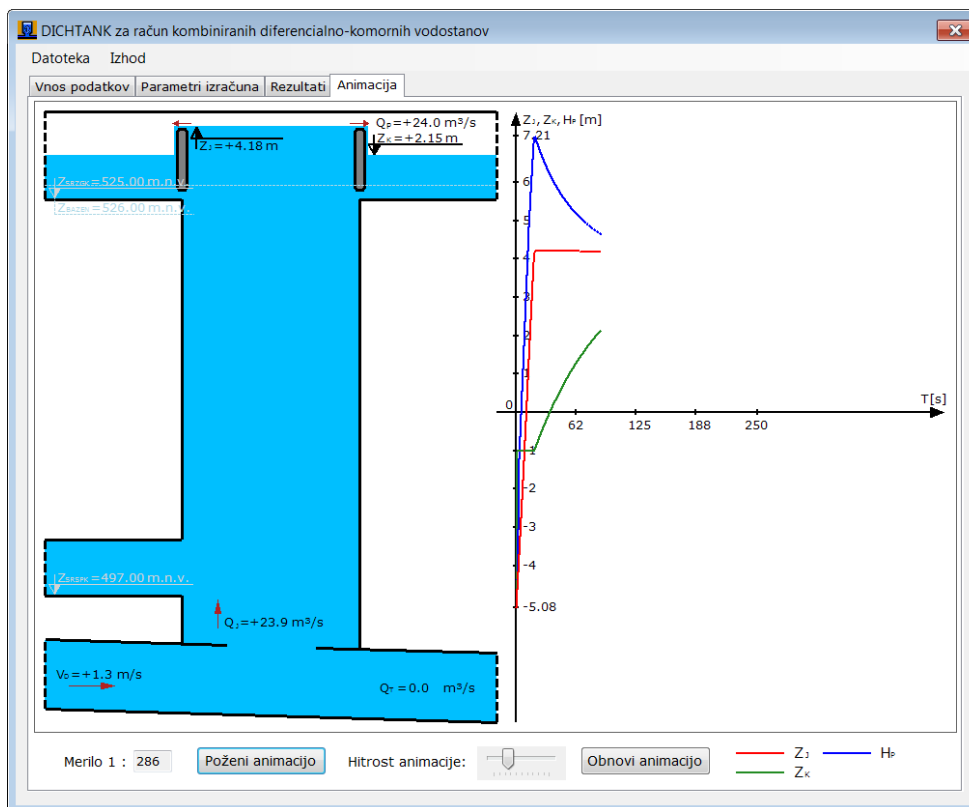
LEGENDA REZULTATOV
T - čas simulacije [s]
V₀ - hitrost toka v dovodnem rovu [m/s]
Q_j - pretok po jašku [m³/s]
Q_k - pretok v komoro [m³/s]
Q_p - pretok preko preliva [m³/s]
Z_j - denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu [m]
Z_k - denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu [m]
H_p - denivelacija tlaka pod sp. dušilko glede na koto gladine v bazenu [m]
Q_T - pretok v tlačnem rovu [m³/s]

DIMENZIONIRANJE VODOSTANA
maxZ_{vod} = 530.20 m.n.v....max. kota gladine v vodostanu
minZ_{vod} = 520.92 m.n.v....min. kota gladine v vodostanu
V_{max} = 531.20 m.n.v....kota pokrova vodostana
V_{min} = 493.45 m.n.v....kota vtoka v vodostan
H_{vod} = 37.75 m...ustrezna višina vodostana

DODATNI REZULTATI GLEDE NA INSTALIRANI PRETOK
Hitrost udarnega vala v dovodnem rovu = 1017.10 m/s
Trenje v dovodnem rovu (λ) na podlagi n_{grov} = 0.01240
Trenje v dovodnem rovu (λ) na podlagi Re = 0.01385
Izgube v dovodnem rovu na podlagi λ (Re) = 5.08 m
Hitrost udarnega vala v tlačnem rovu = 1017.10 m/s
Trenje v tlačnem rovu (λ) na podlagi n_{grov} = 0.01240
Trenje v tlačnem rovu (λ) na podlagi Re = 0.01385
Izgube v tlačnem rovu na podlagi λ (Re) = 5.08 m

Slika 20: Program DIGHTANK (zavihek Rezultati)

Pod zavihkom Animacija se nam glede na podane podatke po izračunu na levi strani izriše vodostan v merilu, ki je izpisano v levem spodnjem kotu. Grafični prikaz v merilu prikazuje stik dovodnega ter tlačnega rova podanega premera, širino ter višino vodostanskega jaška s spodnjo cilindrično komoro ter zgornjo diferencialno komoro. V določenih primerih širina jaška skupaj s širino zgornje komore v merilu presega območje izrisa same grafike. Nadaljevanje zgornje komore v horizontalni smeri v takšnih primerih nakazujejo črtkane črte, vsi rezultati izračuna pa so vseeno nazorno prikazani. Višinsko sta označena spodnja robova obeh komor Z_{SRZGK} , Z_{SRSPK} ter gladina vode v bazenu Z_{BAZEN} . Znotraj grafike so prikazane tudi naslednje količine rezultatov preračuna za čas $T = 0$: hitrost toka v dovodnem rovu V_D , denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu Z_j , denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu Z_k , pretok v jašku Q_j , pretok preko preliva Q_p in pretok v tlačnem rovu Q_T , ki se med animacijo količinsko spreminjajo. Na desni strani se izrišeta x-os, ki med animacijo prikazuje čas T v s ter y-os, ki prikazuje, kako se s časom spreminjata denivelacija gladine v jašku glede na koto gladine v bazenu Z_j (rdeča črta), denivelacija gladine v komori glede na koto gladine v bazenu Z_k (zelena črta) v m ter denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu H_p (modra črta) v m.



Slika 21: Program DICHTANK (zavihek Animacija)

4.3 Teoretične osnove

V naslednjih poglavjih so predstavljene teoretične osnove preračuna masnih nihanj za vse štiri programe. Osnove izhajajo iz dinamične (18) ter kontinuitetne enačbe (21), reševanje pa poteka po tangenti metodi, ki je predstavljena v poglavju 3.4.3. Prikazani so tudi vsi ključni koraki izračuna, ki vodijo do prikazanih rezultatov. Za lažje razumevanje delovanja programa sta v predhodnih poglavjih predstavljena tudi izračun koeficienta trenja rovov ter enačba, ki preverja stabilnost vodostana. Teoretično ozadje programov je razen preračuna stabilnosti povzeto po navodilih za uporabo paketa VODOSTAN (Širca, 1997). Preračun stabilnosti je povzet po metodi predstavljeni v knjigi Koriščenje vodnih snaga – objekti hidroelektrana avtorja Branislava Đorđevića.

4.3.1 Izračun koeficienta trenja λ dovodnega ter tlačnega rova oz. voda

Koeficient trenja λ dovodnega ter tlačnega rova oz. voda je v turbulentnem režimu časovno spremenljive narave in je odvisen tako od Reynoldsovega števila kot tudi od relativne hrapavosti. Določimo ga lahko po implicitni enačbi Colebrook – Whitea z bisekcijo. V nadaljevanju je predstavljen splošni postopek izračuna koeficienta, ki velja tako za dovodni kot tlačni rov oz. vod. V izračunu je tako potrebno uporabiti le ustrezne podatke dovodnega ali pa tlačnega rova oz. voda, ki jih uporabnik poda pred izračunom masnih nihanj.

Začetni koeficient trenja λ_Z nam predstavlja začetno vrednost za iteriranje in se nanaša na Manningov koeficient hrapavosti rova n_{GROV} (n_{GDROV} za dovodni rova, n_{GTROV} za tlačni rova oz. vod) ter njegov premer d (d_D za dovodni rova, d_T za tlačni rova oz. vod):

$$\lambda_Z = 124,6 \cdot \frac{n_{GROV}^2}{d^{1/3}} \quad (32)$$

Po enačbi Colebrook – White-a lahko končni koeficient trenja λ_K izrazimo na naslednji način:

$$\lambda_K = \left(\frac{1}{-2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \lambda_Z^{1/2}} + \frac{V_{HRAP}}{d \cdot 3,71} \right)} \right)^2 \quad (33)$$

kjer je V_{HRAP} višina hrap v rovu v mm (V_{HRAPD} za dovodni rova, V_{HRAPT} za tlačni rova oz. vod), Re pa Reynoldsovo število definirano po naslednji enačbi:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (34)$$

v predstavlja kinematično viskoznost vode v m^2/s , hitrost vode v rovu v (v enačbi zgoraj) pa količnik med pretokom ter površino rova:

$$v = \frac{Q_R}{S} = \frac{4 \cdot Q_R}{\Pi \cdot d^2} \quad (35)$$

Z zgornjo enačbo Reynoldsovo število pridobi naslednjo obliko:

$$Re = \frac{4 \cdot Q_R}{\Pi \cdot d^2 \cdot \nu} \quad (36)$$

Določitev koeficienta trenja z bisekcijo poteka glede na primerjavo njegove začetne in končne vrednosti. V primeru, ko je njuna razlika manjša od vrednosti 0,00001, nam predstavljata končno vrednost koeficienta, ki ga uporabljamo v nadaljnjem izračunu masnih nihanj v vodostanu. Če ta pogoj ni izpolnjen, se za vrednost začetnega koeficienta trenja vzame polovično vrednost vsote začetnega ter končnega koeficienta. Postopek se ponavlja, dokler se njuna vrednost ne razlikuje za zgornjo vrednost ali manj.

4.3.2 Stabilnost vodostana

V programih je vključen 1. Thomov kriterij stabilnosti vodostanov, ki preračunava minimalno površino horizontalnega preseka vodostana oz. minimalni premer njegovega jaška po naslednji enačbi:

$$D_{JASKA} > \sqrt{\frac{1,15 \cdot 16 \cdot L_D \cdot Q_{INST}^2}{\Pi^2 \cdot d_D^2 \cdot 2g \cdot \Delta h_D \cdot (H_0 - \Delta h_D - 3 \cdot \Delta h_T)}} \quad (37)$$

L_D predstavlja dolžino dovodnega rova, d_D njegov premer v m, Q_{INST} pa instalirani pretok sistema. Δh_D so izgube zaradi trenja v dovodnem rovu, Δh_T pa izgube v tlačnem rovu in jih program preračuna po naslednjih dveh enačbah:

$$\Delta h_D = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_D}{\Pi^2 \cdot g \cdot d_D^5} \cdot Q_{INST} \cdot |Q_{INST}| \quad (38)$$

$$\Delta h_T = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L_T}{\Pi^2 \cdot g \cdot d_T^5} \cdot Q_{INST} \cdot |Q_{INST}| \quad (39)$$

Preračun koeficienta trenja λ tako za dovodni rov kot tlačni rov oz. vod je razviden v prejšnjem poglavju. L_T predstavlja dolžino tlačnega rova oz. voda, d_T njegov premer.

Vključen je tudi 2. Thomov kriterij stabilnosti z naslednjo enačbo:

$$\Delta h_D + \Delta h_T < \frac{1}{3} (Z_{BAZEN} - Z_{ODVOD}) \quad (40)$$

4.3.3 Teoretične osnove programa CHAMTANK

V začetnem času $T = 0$ imamo podan začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov turbine Q_{RZAC} ter začetno koto gladino v vodostanu pred njihovo izvedbo Z_{VODZAC} . Podatka nam predstavljata izhodišče za preračun masnih nihanj v vodostanu med različnimi manevri turbine. Pretok v tlačnem rovu med izvajanjem manevrov program določi po naslednji enačbi, kjer upoštava, da se čas izračuna T nahaja med T_i ter T_{i+1} (enačba izhaja iz robnega pogoja sistema kontinuitetne in dinamične enačbe):

$$Q_T(T) = Q_i + \frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i} \cdot (Q_{i+1} - Q_i) \quad (41)$$

Pari pretokov proti turbini ter njihovi časi Q_i , T_i ter Q_{i+1} , T_{i+1} predstavljajo vsaj 2 manevra turbine, ki morata biti nujno vnešena s strani uporabnika. Ko program določi pretok v tlačnem rovu, uporabi kontinuitetno enačbo za določitev pretoka v vodostanu:

$$Q_{VOD} = Q_{RZAC} - Q_T \quad (42)$$

Pretok v vodostanu pa nam določa nov nivo gladine v njem Z_{VOD} po naslednji enačbi, kjer drugi člen nakazuje spremembo gladine:

$$Z_{VOD} = Z_{VODZAC} + Q_{VOD} \cdot \frac{\Delta t}{S_{VOD}} \quad (43)$$

Δt predstavlja izbran časovni interval izračuna, podan s strani uporabnika, S_{VOD} pa površino horizontalnega preseka vodostana v m^2 v ravnini, kjer se gladina trenutno nahaja. Velikost S_{VOD} preračunava poseben podprogram, ki ugotavlja položaj gladine ter površini vodostanskega jaška prišteva še površino horizontalnega preseka zgornje ali spodnje

komore, če se gladina nahaja na območju njenega vtoka. Izračunavanje izgub na dušilki je določeno po naslednji enačbi:

$$\Delta h_{DU} = \gamma_{DU} \cdot Q_{VOD} \cdot |Q_{VOD}| \quad (44)$$

kjer γ_{DU} predstavlja izgubo dušilke pri vtoku (γ_{DUIN}) ali iztoku (γ_{DUOUT}), podano s strani uporabnika. Denivelacija tlaka pod dušilko glede na koto gladine v bazenu H_P je v rezultatih izračuna masnih nihanj določena z naslednjo enačbo:

$$H_P = Z_{VOD} + \Delta h_D \quad (45)$$

Po izračunu izgub program uporabi dinamično enačbo kot zadnji korak tangentne metode za preračun pretoka v dovodnem rovu za naslednji časovni korak na naslednji način:

$$Q_R = Q_{RZAC} - (Z_{VOD} + \Delta h_D + \Delta h_{DU}) \cdot \frac{\Delta t \cdot g \cdot S_D}{L_D} \quad (46)$$

Upoštevati je potrebno, da znotraj enačbe za izgube zaradi trenja v dovodnem rovu Δh_D uporabi pretok Q_{RZAC} , enačba izračuna je predstavljena v poglavju stabilnost vodostana. S_D predstavlja površino prereza dovodnega rova, L_D pa njegovo dolžino. Zgoraj opisani koraki preračuna se za vsak časovni korak posebej izvršijo na identičen način, le da se po koncu izračuna upošteva, da je $Q_{RZAC} = Q_R$ ter $Z_{VODZAC} = Z_{VOD}$ ter podobno se za vsak naslednji korak privzame, da so preračunane vrednosti Q_R ter Z_{VOD} prejšnjega koraka tiste, ki se uporabijo znotraj enačb trenutnega koraka.

4.3.4 Teoretične osnove programa CHAMTAM1

Teoretične osnove programa CHAMTAM1 so identične osnovam programa CHAMTANK. Medsebojno se programa razlikujeta le pri izračunavanju površine horizontalnega prereza zgornje komore, ki je prizmatične oblike. Ostali koraki izračuna so popolnoma identični.

4.3.5 Teoretične osnove programa DIFFTANK

V začetnem času $T = 0$ imamo podane naslednje podatke, ki se nanašajo na čas pred izvajanjem manevrov turbine: začetni pretok v sistemu Q_{RZAC} , začetni pretok v jašku Q_{JZAC} , začetni pretok v komori Q_{KZAC} , začetni pretok prelivanja Q_{PZAC} , začetno koto gladine v jašku Z_{JZAC} ter začetno koto gladine v komori Z_{KZAC} . Podatki nam predstavljajo izhodišče za preračun masnih nihanj v vodostanu med različnimi manevri turbine. Pretok v tlačnem rovu med izvajanjem manevrov program določi po znani enačbi iz podanih parov časov ter pretokov na turbino:

$$Q_T(T) = Q_i + \frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i} \cdot (Q_{i+1} - Q_i) \quad (47)$$

Program med izračunom vseskozi ugotavlja ali prihaja do prelivanja iz jaška v komoro ter obratno ali pa prihaja samo do izenačevanja njunih gladin brez prelivanja. Če do prelivanja ne prihaja, za izračun uporabi postopek, opisan v nadaljevanju. Po dinamični enačbi izrazi pretok dovodnega rova novega časovnega koraka z naslednjo enačbo (določitev izgub

zaradi trenja v dovodnem rovu je prikazana v poglavju teoretičnih osnov programa CHAMTANK):

$$Q_R = Q_{RZAC} - (Z_{JZAC} + \Delta h_D) \cdot \frac{\Delta t \cdot g \cdot S_D}{L_D} \quad (48)$$

S_D predstavlja površino prereza dovodnega rova, L_D pa njegovo dolžino. Za izračun pretoka v jašku se uporabi kontinuitetna enačba:

$$Q_J = Q_R - Q_T - Q_{KZAC} \quad (49)$$

Za določitev gladine v njem pa naslednja, kjer drugi člen nakazuje sprembo gladine:

$$Z_J = Z_{JZAC} + Q_J \cdot \frac{\Delta t}{S_{JASEK}} \quad (50)$$

Δt je časovni korak, izbran s strani uporabnika, S_{JASEK} pa površina horizontalnega prereza vodostanskega jaška. Pretok v komori preko dušilke program določi z naslednjo enačbo, ki je identična izrazu za račun gladin v veznih posodah:

$$Q_K = \mu_{DU} \cdot S_{DUSILKA} \cdot \sqrt{2g \cdot (Z_J - Z_{KZAC})} \quad (51)$$

μ_{DU} predstavlja koeficient dušilke (μ_{DUIN} za primer vtoka ter μ_{DUOUT} za primer iztoka iz komore), $S_{DUSILKA}$ pa je njena površina. Gladina v komori je po zgornji analogiji preračunana z enačbo:

$$Z_K = Z_{KZAC} + Q_K \cdot \frac{\Delta t}{S_{KOMORA}} \quad (52)$$

S_{KOMORA} predstavlja površino horizontalnega prereza vodostanske komore. V primeru, ko do prelivanja prihaja, ločimo štiri različna stanja:

- nepotopljeno prelivanje iz jaška v komoro
- potopljeno prelivanje iz jaška v komoro
- nepotopljeno prelivanje iz komore v jašek
- potopljeno prelivanje iz komore v jašek

V primeru nepotopljenega prelivanja iz jaška v komoro se na identičen način uporabita dinamična ter kontinuitetna enačba zgornjega postopka za primer brez prelivanja. Pretok preko preliva v vodostansko komoro program določi z uporabo naslednje enačbe:

$$Q_P = \mu_{PRELIV} \cdot B_{PRELIV} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|Z_J - Z_{PRELIV}|^3} \quad (53)$$

μ_{PRELIV} je koeficient pretoka na prelivu, B_{PRELIV} njegova dolžina ter Z_{PRELIV} njegova kota. Temu sledi popravek oziroma osvežitev gladine v jašku prav zaradi prelivanja samega:

$$Z_J = Z_{JZAC} + (Q_J - Q_P) \cdot \frac{\Delta t}{S_{JASEK}} \quad (54)$$

Pretok v komoro je določen identično že po zgoraj predstavljeni enačbi, le izraz za gladino v njej je nekoliko preoblikovan zaradi prelivanja:

$$Z_K = Z_{KZAC} + (Q_K + Q_P) \cdot \frac{\Delta t}{S_{KOMORA}} \quad (55)$$

V primeru potopljenega prelivanja iz jaška v komoro je postopek identičen, spremeni se le enačba pretoka preko preliva, kjer se namesto kote preliva upošteva kota gladine v komori:

$$Q_P = \mu_{PRELIV} \cdot B_{PRELIV} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|Z_J - Z_K|^3} \quad (56)$$

V primeru nepotopljenega prelivanja iz komore v jašek se na identičen način uporabita dinamična ter kontinuitetna enačba zgornjih postopkov. Pretok preko preliva v jašek program določi z uporabo naslednje enačbe:

$$Q_P = -\mu_{PRELIV} \cdot B_{PRELIV} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|Z_K - Z_{PRELIV}|^3} \quad (57)$$

μ_{PRELIV} je koeficient pretoka na prelivu, B_{PRELIV} njegova dolžina ter Z_{PRELIV} njegova kota. Temu sledi popravek oziroma osvežitev gladine v jašku prav zaradi prelivanja samega:

$$Z_J = Z_{JZAC} + (Q_J - Q_P) \cdot \frac{\Delta t}{S_{JASEK}} \quad (58)$$

Pretok v komoro je določen identično že po zgoraj predstavljeni enačbi, le izraz za gladino v njej je nekoliko preoblikovan zaradi prelivanja:

$$Z_K = Z_{KZAC} + (Q_K + Q_P) \cdot \frac{\Delta t}{S_{KOMORA}} \quad (59)$$

V primeru potopljenega prelivanja iz komore v jašek je postopek identičen, spremeni se le enačba pretoka preko preliva, kjer se namesto kote preliva upošteva kota gladine v jašku:

$$Q_P = \mu_{PRELIV} \cdot B_{PRELIV} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|Z_K - Z_J|^3} \quad (60)$$

Za vsak časovni korak posebej se izvaja zgoraj opisani postopek izračuna, kjer se vrednosti izračunanih rezultatov Z_K , Z_J , Q_K , Q_J ter Q_P uporabijo kot vhodni podatki izračuna naslednjega koraka.

4.3.6 Teoretične osnove programa DICHTANK

Teoretične osnove programa DICHTANK so identične osnovam programa CHAMTANK ter DIFFTANK, zato jih podrobneje ne bom predstavljal. Upošteva se kombinacija enačb za zgornji diferencialni vodostan, predstavljenih v poglavju teoretičnih osnov programa DIFFTANK ter enačb za spodnji cilindrični vodostan, predstavljenih v poglavju teoretičnih osnov programa CHAMTANK.

5 IZRAČUN MASNIH NIHANJ S POMOČJO PROGRAMA CHAMTANK

5.1 Enostavni cilindrični vodostan

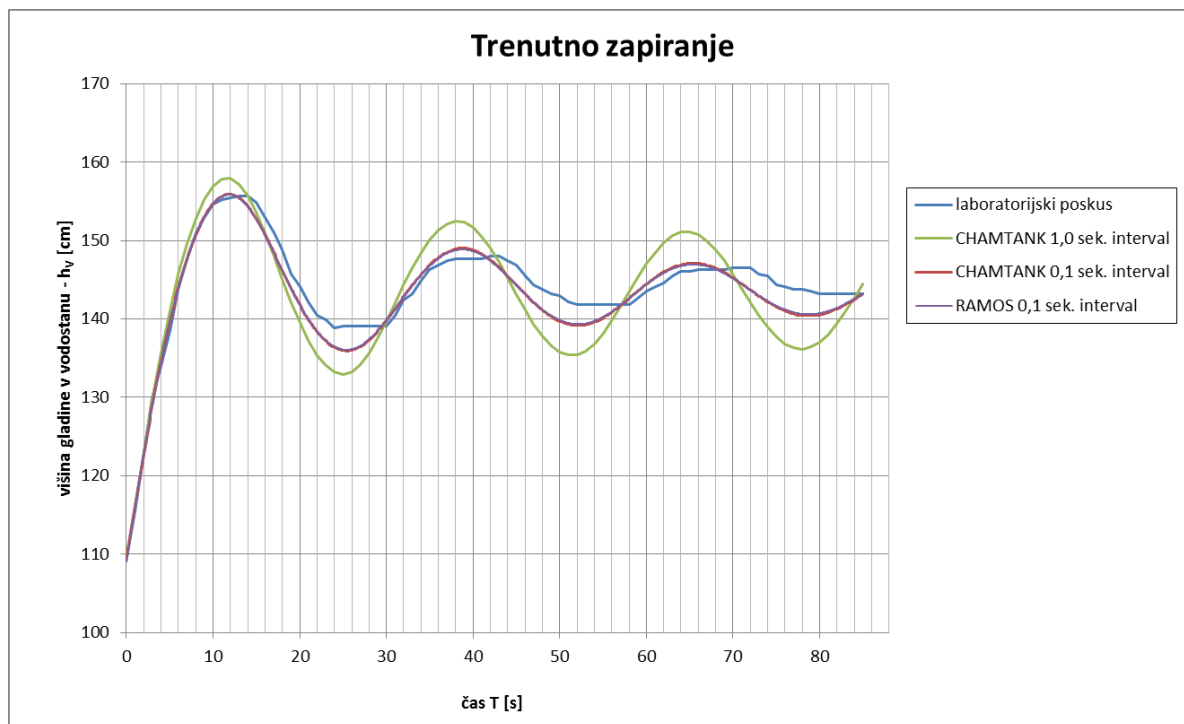
V okviru vaj pri predmetu Hidravlika nestalnega toka se je za študente FGG hidrotehnične smeri v 4. letnikih izvajal laboratorijski poskus masnega nihanja v modelu enostavnega cilindričnega vodostanu. Tekom mojega študija se je poskus izvedel 13. 1. 2010. Model se nahaja v hidravličnem laboratoriju Katedre za mehaniko tekočin (Inštitut za hidravlične raziskave) Oddelka za okoljsko gradbeništvo na Hajdrihovi 28 v Ljubljani.



Slika 22: Model cilindričnega vodostana v hidravličnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave

Vodostan ima krožni presek premera 44 cm. Stene so iz akrilnega stekla, kar nam omogoča nemoteno opazovanje nihanje gladine vode med poskusi različnih obratovalnih manevrov. Na vrhu vodostana je nameščen limnigraf, ki omogoča zapis sprememb nivoja gladine. Izvedel se je poskus trenutnega zapiranja ter postopnega linearnega odpiranja sistema (v času 7 s se je pretok povečal na $0,0107 \text{ m}^3/\text{s}$). Laboratorijski poskus se je preračunal s pomočjo programa CHAMTANK, kjer so se upoštevale vrednosti vhodnih spremenljivk, prikazane v prilogah A1 ter A2. Prav tako se je je poskus preračunal s pomočjo programa RAMOS (Račun Masnih Oscilacij). Avtor programa je Rudi Rajar, koda programa, ki je napisana v jeziku BASIC, je dostopna v njegovi knjigi Hidravlika nestalnega toka. Gre za program, ki je namenjen izključno preračunavanju masnih nihanj v cilindričnih vodostanih in je primeren za primerjavo s programom CHAMTANK. Znotraj programa se prav tako uporablja tangentsna metoda reševanja enačb, razlika je le v določitvi energijskih izgub

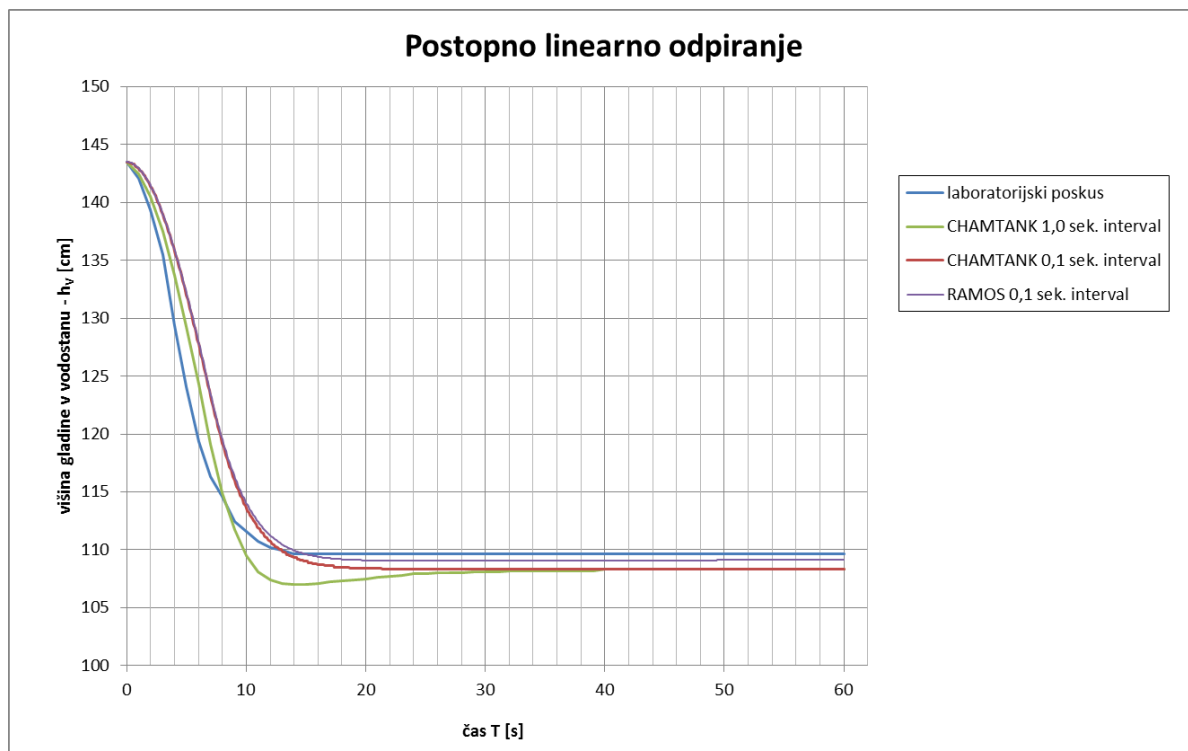
dovodnega rova. Izgube so določene po enačbi (13), s pomočjo karakteristike rova η . Karakteristika se določi s pomočjo začetnega pogoja iz dinamične enačbe po enačbi (30).



Grafikon 1: Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine na modelu vodostana, zgrajenem v hidravličnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave, za poskus trenutnega zapiranja sistema

Med izvedenim poskusom je gladina dosegla največjo višino 155,7 cm, po izračunu v programu CHAMTANK z upoštevanjem 1,0 s časovnega intervala gladina doseže višino 157,9 cm, po izračunu z 0,1 s intervalom pa višino 155,9 cm. Rezultati programa RAMOS z upoštevanjem 0,1 s intervala so enaki rezultatom programa CHAMTANK (na grafikonu se rdeča ter vijolična črta prekrivata).

Bistvena informacija, ki izhaja iz trenutnega zapiranja turbine, je najvišji možni nivo, ki ga doseže gladina v vodostanu in je ključnega pomena pri njegovem dimenzioniranju. Primerjava med preračunano ter izmerjeno maksimalno doseženo višino gladine nam pokaže, da program CHAMTANK omogoča njen realen preračun, saj njuna razlika znaša le 0,2 cm (z upoštevanjem 0,1 sekundnega časovnega intervala). Po pričakovanjih so rezultati preračuna z zmanjševanjem časovnega intervala točnejši. Izvedel se je tudi preračun s časovnim intervalom 0,05 s, vendar to ni imelo nikakršnega vpliva na točnost. Prišlo je do ujemanja z rezultati 0,1 sekundnega časovnega intervala. Ujemanje rezultatov programa RAMOS in CHAMTANK nakazuje na identičnost izračuna izgub v dovodnem rovu, saj ta predstavlja edino razliko v jedru obeh programov. Pričakovali bi, da je program CHAMTANK natančnejši, saj je metoda izračuna izgub (izračun koeficienta trenja dovodnega rova z enačbo Colebrook – Whitea po metodi bisekcije, s katerim preračunamo same izgube) kompleksnejša od metode programa RAMOS (izgube so preračunane s pomočjo karakteristike rova η).



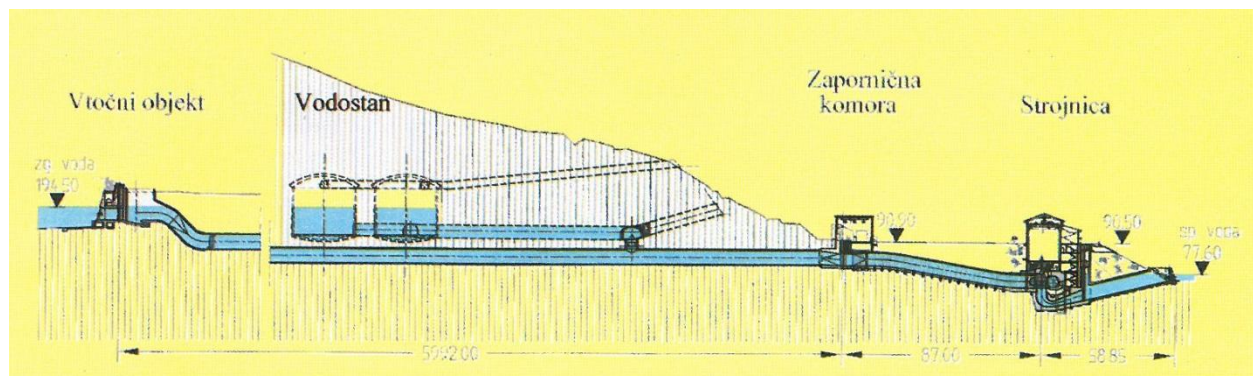
Grafikon 2: Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine na modelu vodostana, zgrajenem v hidravličnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave, za poskus postopnega linearnega odpiranja sistema

Minimalna višina gladine med poskusom postopnega linearnega odpiranja sistema je znašala 109,6 cm, po izračunu v programu CHAMTANK z upoštevanjem 1,0 sekundnega časovnega intervala ta višina znaša 107,0 cm, po izračunu z 0,1 sekundnim intervalom pa 108,3 cm. Izračun s programom RAMOS z upoštevanjem 0,1 sekundnega intervala pa nam poda minimalno višino 109,1 cm.

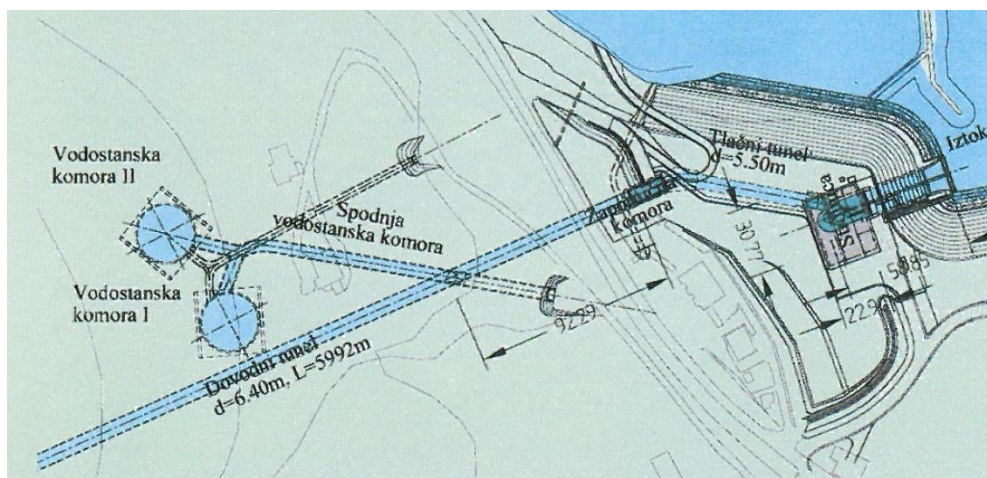
Informacija, ki je prav tako odločilna pri dimenzioniranju vodostana je minimalni nivo gladine v njem, ki je dosežen, ko v stanju mirovanja HE, v najkrajšem možnem času, povečamo pretok v sistemu na maksimalno vrednost (instalirani pretok HE). Iz primerjave med preračunano ter izmerjeno minimalno doseženo gladino je razvidno, da preračun ni tako točen kot pri poskusu trenutnega zapiranja sistema. Razlika med gladinama pri upoštevanju 0,1 sekundnega časovnega intervala znaša 1,5 cm. Preračun s programom RAMOS nam v tem primeru poda celo točnejši rezultat, ki se od realne vrednosti razlikuje le za 0,6 cm. Preračun z 0,05 sekundnim časovnim intervalom ni podal točnejših rezultatov od preračuna z 0,1 sekundnim intervalom.

5.2 Vodostan s spodnjo komoro HE Plave II

S pomočjo programa CHAMTANK se je izvedel preračun masnih nihanj za realna primera odpiranja ter zapiranja sistema v HE Plave II. Vodostan HE ima 2 cilindrična jaška premera 26,22 m in višine 20,04 m, ki se preko skupne spodnje komore priključujeta na dovodni rov (priključek je izveden na koncu komore in ne pod jaški vodostana, kot je to upoštevano v programih paketa VODOSTAN).

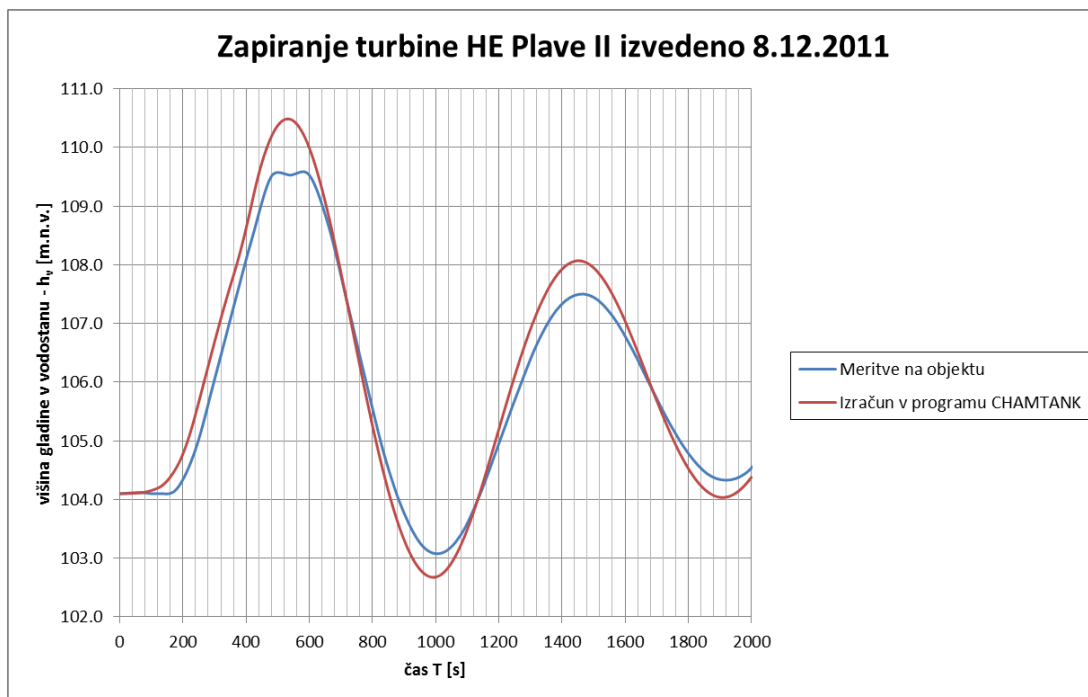


Slika 23: Vzdolžni profil HE Plave II

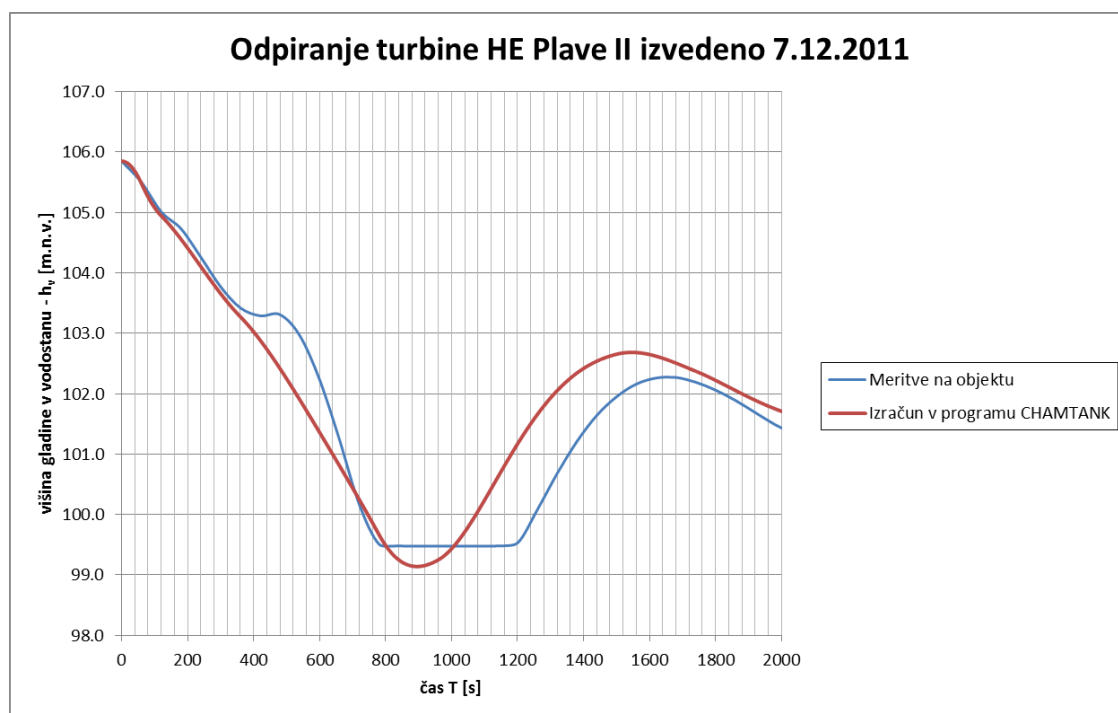


Slika 24: Situacija območja strojnice HE Plave II

Znotraj programa se je upošteval samo 1 jašek, z ekvivalentno površino oz. volumnom, premera 37,1 m. Izvedel se je preračun zapiranja sistema, ki se je vršil 8. 12. 2011 (v času 7 min se je pretok skozi turbine postopoma ter nelinearno zmanjšal iz 58,7 m³/s na 0,0 m³/s) ter odpiranja sistema, ki se je vršil 7. 12. 2011 (v času 16 min se je pretok skozi turbine postopoma ter nelinearno zvečal iz 0,0 m³/s na 99,5 m³/s). Dogodka sta izbrana načrtno, saj predstavljata kritična primera, ko gladina v vodostanu doseže maksimalni ter minimalni nivo. Podatke meritev na objektu mi je posredovala družba Soške elektrarne Nova Gorica v obliki tekstovne datoteke, kjer so na minuto natančno zabeležene spremembe pretoka na turbini ter spremembe nivoja gladine v vodostanu. Vhodni podatki za oba primera so razvidni iz prilog A3 ter A4. Karakteristike sistema HE Plave II, ki so del vhodnih podatkov, so pridobljene iz hidravlične presoje vodostana HE Plave II (Rodič, 2000) ter seminarske naloge za podiplomski študij pri predmetu Nestalni pojavi – Račun masnih oscilacij v vodostanih (Rodič, 2008). Spodnja dva grafikona prikazujeta primerjavo med merjenimi ter preračunanimi rezultati nihanja gladine v vodostanu.



Grafikon 3: Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine v vodostanu HE Plave II za primer zapiranja sistema 8. 12. 2011



Grafikon 4: Primerjava izračunanih in izmerjenih višin gladine v vodostanu HE Plave II za primer odpiranja sistema 7. 12. 2011

Pri zapiranju sistema je realno gladina dosegla maksimalno koto 109,53 m.n.v., pri preračunu pa 110,49 m.n.v. (razlika znaša 0,96 m). Pri odpiranju je realno gladina dosegla minimalno koto 99,48 m.n.v., pri preračunu pa 99,14 m.n.v. (razlika znaša 0,34 m). V obeh

primerih se je upošteval 0,1 sekundni časovni interval izračuna. Izvedel se je tudi preračun z 0,05 sekundnim časovnim intervalom, ki pa na točnost preračuna ponovno ni imel nobenega vpliva.

Potrebno se je zavedati, da je netočnost izračuna posledica oblike sistema vodostana, ki za naš program ni najbolj primeren. V programu za tak sistem niso upoštevane izgube pri toku vode skozi spodnjo komoro ter izgube pri vtoku v oba cilindrična jaška. Poenostavitev z združitvijo obeh vodostanskih jaškov v enega, na točnost izračuna nima vpliva. Program operira z volumnom jaška, ki ga lahko dimenzijsko poljubno spreminjamo, upoštevati je potrebno le pogoje za njegovo stabilnost.

6 ZAKLJUČEK

Glede na rezultate obeh primerov lahko trdimo, da programa CHAMTANK ter CHAMTAM1 dokaj natančno prikazujeta realno obnašanje masnih nihanj v vodostanih s komorami in sta primerna za nadaljno uporabo pri dimenzioniranju. Rezultati nakazujejo, da v primeru zapiranja turbine preračunan nivo gladine presega realno doseženo gladino, v primeru odpiranja turbine pa je preračunan nivo gladine nižje od realno dosežene. Če bi tako med gradnjo upoštevali preračune dimenzije vodostana v programu VODOSTAN, bi to pomenilo, da je le-ta ustrezen oziroma omogoča nemoteno delovanje HE. V nobenem primeru ne bi prišlo do napak v delovanju v obliki preliivanja vode iz popolnoma napolnjenega vodostanskega jaška ali zajema zraka v tlačni rov.

Pred posodobitvijo programskega paketa se je predpostavil minimalni časovni korak izračuna 0,1 s. Predpostavljeni korak se je pri obeh realnih primerih vodostana izkazal za smiselnega, saj z njegovim zmanjševanjem točnosti preračuna ne povečujemo. Bistveno pa se podaljša čas preračunavanja samega programa.

Pri preračunavanju primera za linearno odpiranje sistema modela cilindričnega vodostana program RAMOS podaja natančnejše rezultate kot program CHAMTANK. Pri preračunu trenutnega zapiranja sistema pa je program RAMOS podal identične rezultate kot program CHAMTANK. Na tem mestu se je smiselno vprašati ali ni metoda preračuna izgub dovodnega rova znotraj programa RAMOS točnejša od naše privzete metode. Izvedel se je preračun masnih nihanj z metodo uporabljeno v programu RAMOS, vendar pri obeh primerih zapiranja ter odpiranja sistema HE Plave II ni prišlo do večjih razlik med izračunoma (ponovno je prišlo do ujemanja rezultatov, kjer za nobeno metodo ne moremo trditi, da ja natančnejša od druge). Zato se je prvotna metoda izračuna izgub dovodnega rova ohranila in je ostala nespremenjena.

Potrebno je še opozoriti, da so programi namenjeni preračunavanju masnih nihanj s čim krajšimi končnimi časi, med katerimi se odvijajo ključne faze masnega nihanja v vodostanu glede na manevre turbine. Vnos končnega časa ranga nekaj 1000 sekund ob izbiri minimalnega časovnega intervala 0,1 s povzroči, da je program nekaj časa neodziven, saj gre za preračun ogromnih količin podatkov. Dodatno neodzivnost povzroči tudi tabela pod zavihkom *Rezultati*, kamor se vpisujejo vse preračunane količine. Ponovno gre za ogromno količino podatkov, ki jih tudi najsodobnejši računalniki ne morejo obdelati v trenutku. Vsi manjši končni časi pa so neproblematični in jih programi obdelajo v zelo kratkem času z minimalnim neodzivnim časom. Podobno velja opozoriti na hitrost animacije po končanem

izračunu nihanj. Animacija predstavlja pregled vseh izvrednotenih količin in navkljub pospeševanju hitrosti prikaza, je v primeru daljših končnih časov le-ta zelo počasna in ne omogoča hitrega pregleda obnašanja masnega nihanja. Izbira krajših končnih časov s ključnimi manevri turbine predstavlja rešitev za vse zgoraj navedene probleme.

»Ta stran je namenoma prazna«.

VIRI

Uporabljeni viri

Đorđević, B. 1989. Koriščenje vodnih snaga – objekti hidroelektrana. Drugo dopunjeno izdanje. Beograd, Građevinski fakultet: 474 str.

Jordan, V. 1983. Prehodni režimi v hidravličnih cevnih sistemih. Ljubljana, Partizanska knjiga: 331 str.

Mosonyi, E. 1960. Water power development. Vol. 2. High-head power plants : midget stations and pumped-storage schemes. Budimpešta, Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences: 1139 str.

Otter, P. 1988. Design an operation of a differential surge tank. V: Clowes, B.W.(ur.). Zbornik Water power 87. ASCE: p. 1691-1700.

Pemič, A., Mikoš, M. 2007. Inženirska hidrotehnika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 460 str.

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Rodič, P. 2000. Hidravlična presoja vodostana HE Plave II. Acta hydrotechnica 18, 28: 69-70.

SENG d.o.o. 2012. Meritve – vodni stolpi (vodostani). Osebna komunikacija. (10. 12. 2012.)

Singamsetti, S.R., Singh, P.N. 1979. Design considerations for a differential surge tank. Water Power & Dam Construction 1: 48-50.

Singamsetti, S.R., Singh, P.N. 1980. Design considerations for a differential surge tank. Water Power & Dam Construction 2: 44-48.

Širca, A. 1997. Aplikacija VODOSTAN – Paket programov za račun masnih nihanj v vodostanih. Ljubljana, IBE, d.d..

Širca, A. 1997. Navodila – VODOSTAN – Paket programov za račun masnih nihanj v vodostanih. Ljubljana, IBE, d.d..

Širca, A. 2009. Hidravlika nestalnega toka – Predavanje Vodostani. Neobjavljeno študijsko gradivo. Gradivo za pripravo na laboratorijsko vajo Masna nihanja v vodostanu - študijsko leto 2008/2009, Hidrotehnična smer FGG: loč. pag.

Ostali viri

Rajar, R. 1997. Hidromehanika. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 235 str.

Steinman, F. 1999. Hidravlika, 1. ponatis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.

PRILOGE

PRILOGA A: Vhodni podatki preračuna gladine v modelu vodostanu hidravličnega laboratorija za poskus trenutnega zapiranja sistema

PRILOGA B: Vhodni podatki preračuna gladine v modelu vodostanu hidravličnega laboratorija za poskus postopnega linearnega odpiranja sistema

PRILOGA C: Vhodni podatki preračuna gladine v vodostanu HE Plave II za primer zapiranja sistema

PRILOGA D: Vhodni podatki preračuna gladine v vodostanu HE Plave II za primer odpiranja sistema

PRILOGA A: Vhodni podatki preračuna gladine v modelu vodostanu hidravličnega laboratorija za poskus trenutnega zapiranja sistema

1. DOVODNI ROV IN BAZEN

- $Q(\text{INST}) = 0.0107 \text{ m}^3/\text{s}$...instalirani pretok
- $L(\text{D}) = 9.77 \text{ m}$...dolžina dovodnega rova
- $d(\text{D}) = 0.104 \text{ m}$...premer dovodnega rova
- $Z(\text{BAZEN}) = 201.435 \text{ m.n.v.}$...kota gladine v bazenu
- $Z(\text{ROVZG}) = 195 \text{ m.n.v.}$...zg. kota osi dovodnega rova
- $Z(\text{ROVSP}) = 190 \text{ m.n.v.}$...sp. kota osi dovodnega rova
- $n(\text{GDROV}) = 0.013 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja dovodnega rova
- $D(\text{DROV}) = 0.005 \text{ m}$...debelina stene dovodnega rova
- $E(\text{DROV}) = 210 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti dovodnega rova
- $V(\text{HRAPD}) = 1.8 \text{ mm}$...višina hrap dovodnega rova

2. TLAČNI ROV/VOD IN ODVOD VODE

- $L(\text{T}) = 9.77 \text{ m}$...dolžina tlačnega rova/voda
- $d(\text{T}) = 0.104 \text{ m}$...premer tlačnega rova/voda
- $n(\text{GTROV}) = 0.013 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja tlačnega rova/voda
- $D(\text{TROV}) = 0.005 \text{ m}$...debelina stene tlačnega rova/voda
- $E(\text{TROV}) = 210 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti tlačnega rova/voda
- $V(\text{HRAPT}) = 1.8 \text{ mm}$...višina hrap tlačnega rova/voda
- $Z(\text{ODVOD}) = 160 \text{ m.n.v.}$...kota gladine odvoda vode

3. KARAKTERISTIKE VODE

- $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$...gostota
- $K = 2.207 \text{ GN/m}^2$...modul stisljivosti
- $\nu = 0.00001011 \text{ m}^2/\text{s}$...kinematična viskoznost

4. STABILNOST VODOSTANA

- $D(\text{JASKA}) > 0.03 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška

5. VODOSTAN

- $\gamma(\text{DUIN}) = 0 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri vtoku
- $\gamma(\text{DUOUT}) = 0 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri iztoku
- $D(\text{JASKA}) = 0.44 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška
- $D(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...premer zgornje komore
- $L(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...dolžina zgornje komore
- $Z(\text{SRZGK}) = 0 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba zgornje komore
- $D(\text{SPK}) = 0 \text{ m}$...premer spodnje komore
- $L(\text{SPK}) = 0 \text{ m}$...dolžina spodnje komore
- $Z(\text{SRSPK}) = 0 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba spodnje komore

6. PARAMETRI IZRAČUNA

- $\Delta T = 1, 0.1 \text{ s}$...časovni korak izračuna
- $T(\text{KON}) = 90 \text{ s}$...končni čas izračuna
- $Q(\text{RZAC}) = 0.0107 \text{ m}^3/\text{s}$...začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov
- $Z(\text{VODZAC}) = 201.091 \text{ m.n.v.}$...začetna kota gladine v vodostanu pred izvedbo manevrov
- $N = 2$...število manevrov turbine
 - ◊1. manever: $t(1) = 0 \text{ s}$; $Q(1) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊2. manever: $t(2) = 90 \text{ s}$; $Q(2) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

PRILOGA B: Vhodni podatki preračuna gladine v modelu vodostanu hidravličnega laboratorija za poskus postopnega linearnega odpiranja sistema

1. DOVODNI ROV IN BAZEN

- $Q(\text{INST}) = 0.0107 \text{ m}^3/\text{s}$...instalirani pretok
- $L(\text{D}) = 9.77 \text{ m}$...dolžina dovodnega rova
- $d(\text{D}) = 0.104 \text{ m}$...premer dovodnega rova
- $Z(\text{BAZEN}) = 201.435 \text{ m.n.v.}$...kota gladine v bazenu
- $Z(\text{ROVZG}) = 195 \text{ m.n.v.}$...zg. kota osi dovodnega rova
- $Z(\text{ROVSP}) = 190 \text{ m.n.v.}$...sp. kota osi dovodnega rova
- $n(\text{GDROV}) = 0.013 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja dovodnega rova
- $D(\text{DROV}) = 0.005 \text{ m}$...debelina stene dovodnega rova
- $E(\text{DROV}) = 210 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti dovodnega rova
- $V(\text{HRAPD}) = 1.8 \text{ mm}$...višina hrap dovodnega rova

2. TLAČNI ROV/VOD IN ODVOD VODE

- $L(\text{T}) = 9.77 \text{ m}$...dolžina tlačnega rova/voda
- $d(\text{T}) = 0.104 \text{ m}$...premer tlačnega rova/voda
- $n(\text{GTROV}) = 0.013 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja tlačnega rova/voda
- $D(\text{TROV}) = 0.005 \text{ m}$...debelina stene tlačnega rova/voda
- $E(\text{TROV}) = 210 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti tlačnega rova/voda
- $V(\text{HRAPT}) = 1.8 \text{ mm}$...višina hrap tlačnega rova/voda
- $Z(\text{ODVOD}) = 160 \text{ m.n.v.}$...kota gladine odvoda vode

3. KARAKTERISTIKE VODE

- $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$...gostota
- $K = 2.207 \text{ GN/m}^2$...modul stisljivosti
- $\nu = 0.00001011 \text{ m}^2/\text{s}$...kinematična viskoznost

4. STABILNOST VODOSTANA

- $D(\text{JASKA}) > 0.03 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška

5. VODOSTAN

- $\gamma(\text{DUIN}) = 0 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri vtoku
- $\gamma(\text{DUOUT}) = 0 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri iztoku
- $D(\text{JASKA}) = 0.44 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška
- $D(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...premer zgornje komore
- $L(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...dolžina zgornje komore
- $Z(\text{SRZGK}) = 0 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba zgornje komore
- $D(\text{SPK}) = 0 \text{ m}$...premer spodnje komore
- $L(\text{SPK}) = 0 \text{ m}$...dolžina spodnje komore
- $Z(\text{SRSPK}) = 0 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba spodnje komore

6. PARAMETRI IZRAČUNA

- $\Delta T = 1, 0.1 \text{ s}$...časovni korak izračuna
- $T(\text{KON}) = 60 \text{ s}$...končni čas izračuna
- $Q(\text{RZAC}) = 0.0 \text{ m}^3/\text{s}$...začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov
- $Z(\text{VODZAC}) = 201.435 \text{ m.n.v.}$...začetna kota gladine v vodostanu pred izvedbo manevrov
- $N = 3$...število manevrov turbine
 - ◊1. manever: $t(1) = 0 \text{ s}$; $Q(1) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊2. manever: $t(2) = 7 \text{ s}$; $Q(2) = 0.0107 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊3. manever: $t(2) = 60 \text{ s}$; $Q(2) = 0.0107 \text{ m}^3/\text{s}$

PRILOGA C: Vhodni podatki preračuna gladine v vodostanu HE Plave II za primer zapiranja sistema

1. DOVODNI ROV IN BAZEN

- $Q(\text{INST}) = 105 \text{ m}^3/\text{s}$...instalirani pretok
- $L(\text{D}) = 6112 \text{ m}$...dolžina dovodnega rova
- $d(\text{D}) = 6.4 \text{ m}$...premer dovodnega rova
- $Z(\text{BAZEN}) = 105.85 \text{ m.n.v.}$...kota gladine v bazenu
- $Z(\text{ROVZG}) = 96 \text{ m.n.v.}$...zg. kota osi dovodnega rova
- $Z(\text{ROVSP}) = 84 \text{ m.n.v.}$...sp. kota osi dovodnega rova
- $n(\text{GDROV}) = 0.014 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja dovodnega rova
- $D(\text{DROV}) = 0.3 \text{ m}$...debelina stene dovodnega rova
- $E(\text{DROV}) = 30 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti dovodnega rova
- $V(\text{HRAPD}) = 0.3 \text{ mm}$...višina hrap dovodnega rova

2. TLAČNI ROV/VOD IN ODVOD VODE

- $L(\text{T}) = 183 \text{ m}$...dolžina tlačnega rova/voda
- $d(\text{T}) = 5.95 \text{ m}$...premer tlačnega rova/voda
- $n(\text{GTROV}) = 0.014 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja tlačnega rova/voda
- $D(\text{TROV}) = 0.3 \text{ m}$...debelina stene tlačnega rova/voda
- $E(\text{TROV}) = 30 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti tlačnega rova/voda
- $V(\text{HRAPT}) = 0.3 \text{ mm}$...višina hrap tlačnega rova/voda
- $Z(\text{ODVOD}) = 77.58 \text{ m.n.v.}$...kota gladine odvoda vode

3. KARAKTERISTIKE VODE

- $\rho = 999.87 \text{ kg/m}^3$...gostota
- $K = 2.010 \text{ GN/m}^2$...modul stisljivosti
- $\nu = 0.000001794 \text{ m}^2/\text{s}$...kinematična viskoznost

4. STABILNOST VODOSTANA

- $D(\text{JASKA}) > 238.50 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška

5. VODOSTAN

- $\gamma(\text{DUIN}) = 0.00125 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri vtoku
- $\gamma(\text{DUOUT}) = 0.00078 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri iztoku
- $D(\text{JASKA}) = 37.1 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška
- $D(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...premer zgornje komore
- $L(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...dolžina zgornje komore
- $Z(\text{SRZGK}) = 0 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba zgornje komore
- $D(\text{SPK}) = 2.6 \text{ m}$...premer spodnje komore
- $L(\text{SPK}) = 122 \text{ m}$...dolžina spodnje komore
- $Z(\text{SRSPK}) = 92.12 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba spodnje komore

6. PARAMETRI IZRAČUNA

- $\Delta T = 0.1 \text{ s}$...časovni korak izračuna
- $T(\text{KON}) = 2000 \text{ s}$...končni čas izračuna
- $Q(\text{RZAC}) = 58.7 \text{ m}^3/\text{s}$...začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov
- $Z(\text{VODZAC}) = 104.1 \text{ m.n.v.}$...začetna kota gladine v vodostanu pred izvedbo manevrov
- $N = 9$...število manevrov turbine
 - ◊1. manever: $t(1) = 0 \text{ s}$; $Q(1) = 58.7 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊2. manever: $t(2) = 60 \text{ s}$; $Q(2) = 58.2 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊3. manever: $t(3) = 120 \text{ s}$; $Q(3) = 56 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊4. manever: $t(4) = 180 \text{ s}$; $Q(4) = 47.4 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊5. manever: $t(5) = 240 \text{ s}$; $Q(5) = 32.4 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊6. manever: $t(6) = 300 \text{ s}$; $Q(6) = 25.6 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊7. manever: $t(7) = 360 \text{ s}$; $Q(7) = 19.8 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊8. manever: $t(8) = 420 \text{ s}$; $Q(8) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊9. manever: $t(9) = 2000 \text{ s}$; $Q(9) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

PRILOGA D: Vhodni podatki preračuna gladine v vodostanu HE Plave II za primer odpiranja sistema

1. DOVODNI ROV IN BAZEN

- $Q(\text{INST}) = 105 \text{ m}^3/\text{s}$...instalirani pretok
- $L(\text{D}) = 6112 \text{ m}$...dolžina dovodnega rova
- $d(\text{D}) = 6.4 \text{ m}$...premer dovodnega rova
- $Z(\text{BAZEN}) = 105.85 \text{ m.n.v.}$...kota gladine v bazenu
- $Z(\text{ROVZG}) = 96 \text{ m.n.v.}$...zg. kota osi dovodnega rova
- $Z(\text{ROVSP}) = 84 \text{ m.n.v.}$...sp. kota osi dovodnega rova
- $n(\text{GDROV}) = 0.014 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja dovodnega rova
- $D(\text{DROV}) = 0.3 \text{ m}$...debelina stene dovodnega rova
- $E(\text{DROV}) = 30 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti dovodnega rova
- $V(\text{HRAPD}) = 0.3 \text{ mm}$...višina hrap dovodnega rova

2. TLAČNI ROV/VOD IN ODVOD VODE

- $L(\text{T}) = 183 \text{ m}$...dolžina tlačnega rova/voda
- $d(\text{T}) = 5.95 \text{ m}$...premer tlačnega rova/voda
- $n(\text{GTROV}) = 0.014 \text{ s/m}^{1/3}$...koeficient trenja tlačnega rova/voda
- $D(\text{TROV}) = 0.3 \text{ m}$...debelina stene tlačnega rova/voda
- $E(\text{TROV}) = 30 \text{ GN/m}^2$...modul elastičnosti tlačnega rova/voda
- $V(\text{HRAPT}) = 0.3 \text{ mm}$...višina hrap tlačnega rova/voda
- $Z(\text{ODVOD}) = 77.58 \text{ m.n.v.}$...kota gladine odvoda vode

3. KARAKTERISTIKE VODE

- $\rho = 999.87 \text{ kg/m}^3$...gostota
- $K = 2.010 \text{ GN/m}^2$...modul stisljivosti
- $\nu = 0.000001794 \text{ m}^2/\text{s}$...kinematična viskoznost

4. STABILNOST VODOSTANA

- $D(\text{JASKA}) > 238.50 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška

5. VODOSTAN

- $\gamma(\text{DUIN}) = 0.00125 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri vtoku
- $\gamma(\text{DUOUT}) = 0.00078 \text{ s}^2/\text{m}^5$...faktor izgub dušilke pri iztoku
- $D(\text{JASKA}) = 37.1 \text{ m}$...premer vodostanskega jaška
- $D(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...premer zgornje komore
- $L(\text{ZGK}) = 0 \text{ m}$...dolžina zgornje komore
- $Z(\text{SRZGK}) = 0 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba zgornje komore
- $D(\text{SPK}) = 2.6 \text{ m}$...premer spodnje komore
- $L(\text{SPK}) = 122 \text{ m}$...dolžina spodnje komore
- $Z(\text{SRSPK}) = 92.12 \text{ m.n.v.}$...kota sp. roba spodnje komore

6. PARAMETRI IZRAČUNA

- $\Delta T = 0.1 \text{ s}$...časovni korak izračuna
- $T(\text{KON}) = 2280 \text{ s}$...končni čas izračuna
- $Q(\text{RZAC}) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$...začetni pretok v sistemu pred izvedbo manevrov
- $Z(\text{VODZAC}) = 105.85 \text{ m.n.v.}$...začetna kota gladine v vodostanu pred izvedbo manevrov
- $N = 16$...število manevrov turbine
 - ◊1. manever: $t(1) = 0 \text{ s}$; $Q(1) = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊2. manever: $t(2) = 60 \text{ s}$; $Q(2) = 13.6 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊3. manever: $t(3) = 120 \text{ s}$; $Q(3) = 8.8 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊4. manever: $t(4) = 360 \text{ s}$; $Q(4) = 29.8 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊5. manever: $t(5) = 780 \text{ s}$; $Q(5) = 94.1 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊6. manever: $t(6) = 960 \text{ s}$; $Q(6) = 99.5 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊7. manever: $t(7) = 1500 \text{ s}$; $Q(7) = 87.2 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊8. manever: $t(8) = 1740 \text{ s}$; $Q(8) = 85.9 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ◊9. manever: $t(9) = 2280 \text{ s}$; $Q(9) = 91.2 \text{ m}^3/\text{s}$