

Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Дипломски рад

Повећање тачности мерења нивоа воде
капацитивном сондом са применом на
хидрауличкој анализи водостана са
пригушивачем

Предраг Војт

Београд
децембар 2006.

Садржај

1	Увод.....	2
2	Капацитивне сонде и водостани – опште карактеристике.....	3
2.1	Капацитивне сонде – опште карактеристике.....	3
2.2	Водостани – опште карактеристике.....	8
2.3	Склоп модел - водостан - мерење нивоа.....	10
3	Модел водостана са пригушивачем.....	12
4	Израда антене сонди и детаљна калибрација са анализом стабилности и тачности.....	13
4.1	Израда и калибрација Капацитивне сонда за мерење нивоа.....	13
4.1.1	Капацитивна сонда бр.1 (мања сонда).....	15
4.1.1.1	Калибрација f-h при константној температури	15
4.1.1.2	Утицај температуре при константном нивоу.....	24
4.1.1.3	Збирни утицаји.....	25
4.1.2	Капацитивна сонда бр.2 (већа сонда).....	25
4.1.2.1	Калибрација f-h при константној температури.....	25
4.2	Магнетно-рестриктивна сонда за мерење нивоа.....	30
4.3	Калибрација сонде за притисак.....	31
4.4	Калибрација диференцијалне сонде за притисак.....	33
4.5	Калибрација отворености табластог затварача.....	35
5	Израда математичког модела водостана.....	37
6	Мерења на систему и обрада добијених података.....	41
7	Калибрација математичког модела.....	51
8	Закључак и предлози за наредна истраживања.....	56
9	Прилози.....	57

1

Уводна разматрања

Рад је посвећен анализи стабилности и тачности капацитивних сонди као и хидрауличкој анализи водостана са пригушивачем. У ту сврху израђен је водостан са пригушивачем (тако да се уклопи у постојеће стање хидрауличке лабораторије) и две антене капацитивних сонди. Испитивана је температурна стабилност капацитивних сонди, као и утицај капиларности при динамичким променама нивоа. Хидраулички модел водостана рађен је применом крутог удара о коме ће касније бити речи. Приликом израде модела постављен је услов да узводни гранични услов није константан, јер је приликом мерења на инсталацији добијено да при већим протоцима долази до већих осцилација у нивоу због релативно малог капацитета пумпе.

За потребе дипломског рада направљен је нови водостан са пречником 150mm и пригушивачем пречника 60mm. Водостан је тако пројектован да се уклопа у део постојеће инсталације у хидрауличкој лабораторији. Релативно мали пречник водостана од 150mm изабран је ради што већег осциловања воде (који би се користио за приказивање студентима) са осцилацијама кратких периода, у оквиру којих се може касније анализирати и ефекат пригушивача. Коришћени пригушивач пречника 60mm је тако одабран да смањи максималне осцилације и да вода не изађе из граница водостана. Инсталација дозвољава једноставну промену пригушивача.

Капацитивна сонда је направљена да одговара захтеваним дужинама осцилација у водостану. Испитивање стабилности и тачности вршено је у више фаза. Прва фаза испитивања су утицаји при константној температури тј тражена је тачност и поновљивост по дужини капацитивне сонде за мерење нивоа. За прву фазу испитивања добијена је грешка $\pm 1.43\%$, од пуне скале, при фабричкој апроксимацији капацитивне сонде а када се користила апроксимација полиномом трећег степена добијена је грешка $\pm 0.72\%$, од пуне скале. Сонда је показала добру поновљивост грешке па је одлучено да за сонду може да се направи lookip табела са којом се још више смањује мерна

грешка. При испитивању динамичких утицаја (кретање течности на горе и на доле) на тачност сонде, добијен је хистерезис (клизање) $\pm 1.5\text{mm}$.

У другој фази испитивања испитиван је утицај температуре при константном нивоу како би се добила температурна стабилност сонде. Када се температурни утицај линеаризује грешка је $\pm 1.5\text{mm}$. Када се квалитетно обраде калибрациони резултати, добијено је да се укупна грешка може смањити уз мале трошкове опреме (температурна сонда).

Математички модел водостана са променљивим узводним граничним условом је прављен у Матлабу. Модел је калибрисан уз помоћ добијених резултата мерења на физичком моделу водостана. Математички модел је тако конципиран да омогући каснија једноставна проширења.

2

Капацитивне сонде и водостани – опште карактеристике

У овом поглављу биће приказане опште карактеристике капацитивних сонди за мерење нивоа. Такође овде ће бити приказане опште карактеристике водостана како без тако и са пригушивачем.

2.1 Капацитивне сонде – опште карактеристике

Капацитивна сонда за мерење нивоа припада групи електричних мерних претварача што значи да посредством електричне величине добијамо физичку величину. Антена капацитивне сонде је уствари један кондензатор.

Кондензатор је електротехнички елемент, који може сачувати енергију у облику електричног поља. Његова битна величина је капацитивност. SI јединица за електрични капацитет је 1 F (фарад). Симбол обичног (лево) и поларизованог кондензатора (десно) у електричним шемама можемо видети на слици 2.1.1



Слика 2.1.1 Символ кондензатора у електричним шемама

Кондензатор има две електроде, најчешће плочасте или ваљкасте, између којих се налази диелектрик, који повећава капацитивност и поједностављује израду кондензатора.

Напон на идеалном кондензатору, са капацитетом C , кроз који тече електрична струја $i(t)$, је:

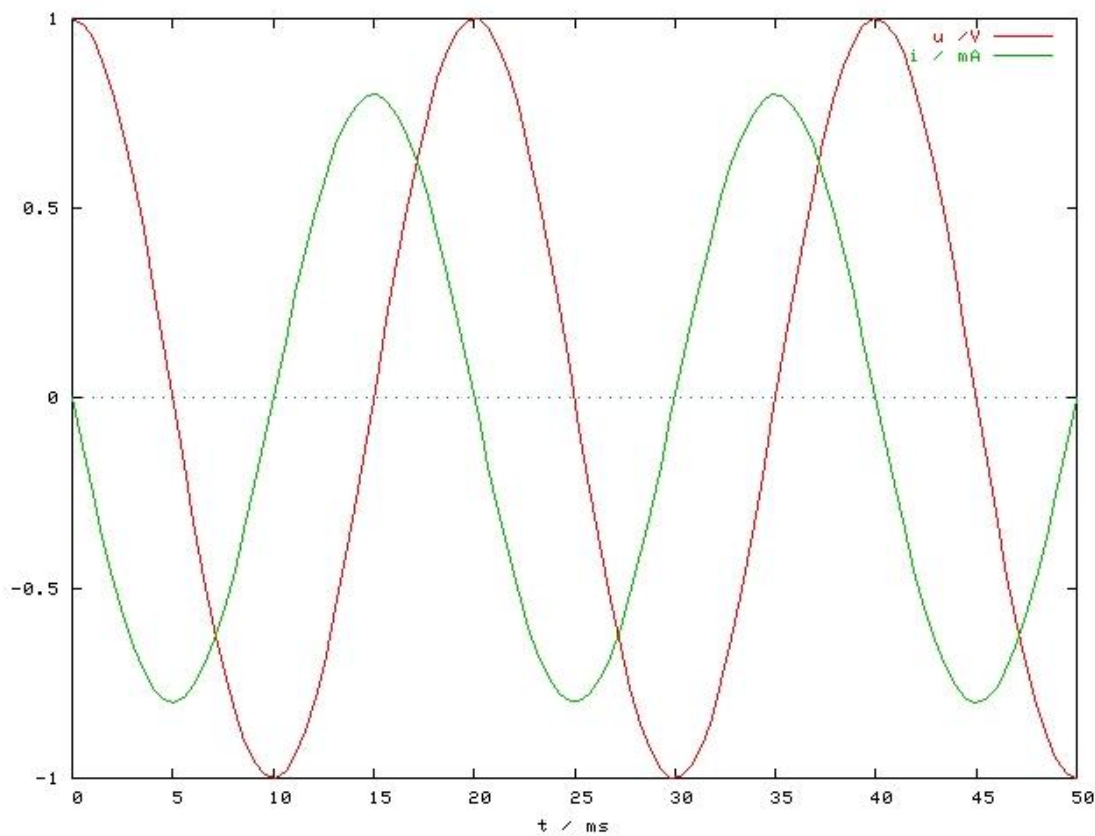
$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t) dt.$$

Минус бесконачно у доњој граници интеграла значи, да је кондензатор нека врста једноставне меморије и да је његов напон зависан такође и од догађања пре тренутка почетка посматрања $t=0$. Инверзна једначина је

$$i(t) = C \frac{d u(t)}{d t}.$$

Када кондензатор прикључимо на синусни наизменични напон $u(t) = U \cos(\omega t)$, према претходној једначини, кроз њега тече наизменична струја (слика 2.1.2)

$$i = - \omega C U \sin(\omega t)$$



Слика 2.1.2 Струја у кондензатору

Запажамо да струја претходи напону за четвртину периода, тј. за $\pi / 2$.

Еквивалентна капацитивност неколико паралелно везаних идеалних кондензатора, једнака је збиру капацитивности тих кондензатора:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N = \sum_{i=1}^N C_i.$$

Код серијској везаних идеалних кондензатора, реципрочна вредност еквивалентне капацитивности једнака је збиру реципрочних вредности капацитивности појединих кондензатора:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}.$$

Дата капацитивност вреди само за одређену температуру, обично за $\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}$. Зависност капацитивности код других температура је линеарна и повезана са температурним коефицијентом α , који је зависан од диелектрика:

$$C = C_0(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)).$$

Електрична величина тачније капацитивност се мења у зависности од нивоа воде тако што вода има једну величину диелектричне константе а ваздух другу (слика 2.1.3).

У табели 2.1.1 приказана је зависност диелектричних константи у зависности од материјала. Можемо уочити да је диелектрична константа воде 80 пута већа од диелектричне константе ваздуха па на основу толике разлике можемо одредити ниво потопљености једног кондензатора (антене капацитивне сонде) (слика 2.1.3). Међутим, диелектрична константа зависи и од температуре: са повећањем температуре долази до смањења диелектричне константе, тако да се тај утицај суперпонира са корисном мерном величином, нивоом воде.

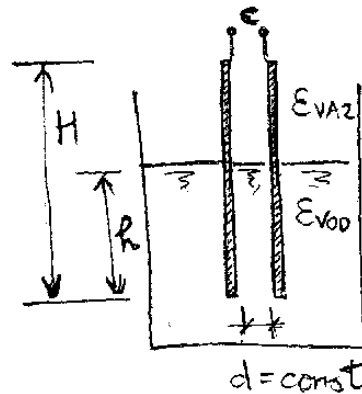
Релативна диелектрична константа материјала показује колико је пута електрично поље јаче у некој средини него у вакууму. Она се мери тако што се мери капацитет кондензатора у вакууму C_0 и са диелектриком C_x а потом нађе однос

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$

Material	Dielectric constant
<u>Вакум</u>	1 (by definition)
<u>Ваздух</u>	1.00054
<u>Полиетилен</u>	2.25
<u>Папир</u>	3.5
<u>PTFE (Teflon(TM))</u>	2.1
<u>Полистирен</u>	2.4-2.7
<u>Пирекс стакло</u>	4.7
Гунма	7
<u>Силикон</u>	11.68
<u>Метанол</u>	30
<u>Вода (20°C)</u>	80.10
<u>Баријум титанат</u>	1200

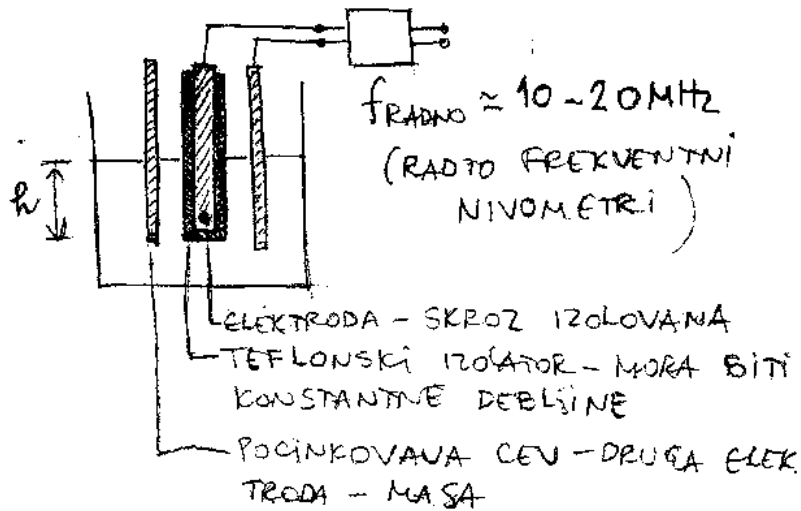
Табела 2.1.1

$$C = C_0 \left[1 + K(\epsilon_{\text{vod}} - 1) \frac{h}{H} \right]$$



Слика 2.1.3: Диелектричне константе

Следећи степен на који ћемо се осврнути је мерење капацитивности. Мерење капацитивности врши се тако што се у електрично коло повеже кондензатор, тачније мерна антена капацитивне сонде и притом се прави осцилаторно коло (слика 2.1.4).



Слика 2.1.4: Принцип капацитивне сонде

Тако се са осцилаторним колом, на излазу добија напонкоји се може директно мерити. Међутим ређе се користи напонски излаз јер се јавља проблем са шумом и због тога се морају користити кратки каблови. Друга варијанта је са конверзијом напона у струју, што се често примењује у индустрији, и тада се користе средње дужине каблова. Трећа варијанта је конверзија

напона у фреквенцију (такав начин раније није био популаран због грешке у конверзији али сада је то повољније) што омогућава веће дужине каблова пошто је такав метод имунији на шуме. На излазу добијамо фреквенцију у опсегу 1-3 КHz (у изведби сонде која је коришћена у овом раду)

Када се осврнемо на фабричке спецификације можемо видети да су капацитивне сонде $\pm 1\%$ тачности па се постаља питање може ли се нешто урадити и побољшати тачност. Прво се треба утврдити порекло грешке која настаје услед мерења, тако се долази до разних сазнања као што су:

- Задржавање воде на антени које зависи од врсте употребљеног материјала и запрљаности антене (зато се и користи тефлон)
- Промена температуре која: мења диелектричну константу, мења дужину сонде и смета електроници у глави сонде
- Несавршеност дебљине тефлона и антене

2.2 Водостани – опште карактеристике

Водостани су објекти у виду резервоара са слободном површином, ограничене величине, који треба да омогући статичку и функционалну сигурност деривационе хидроелектране.

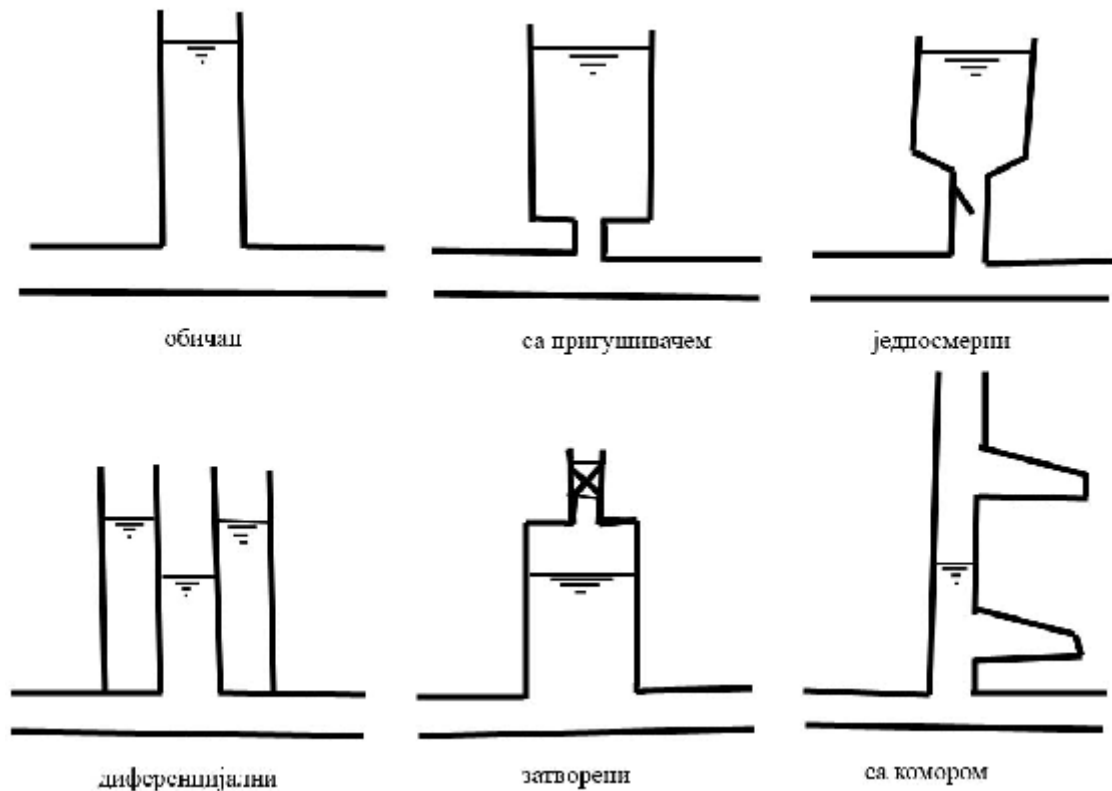
Улога водостана у систему су следеће:

- Да сачувају доводну и одводну деривацију под притиском од хидрауличког удара
- Да смање удар у цевоводу
- Да олакшају регулисање турбине (пумпе) у нестационарним условима
- Да учине економичнијим довод и одвод (уколико је под притиском)

Због различитих захтева које водостан треба да испуни и због тежње да конструкција буде што мања, постоји неколико типова водостана:

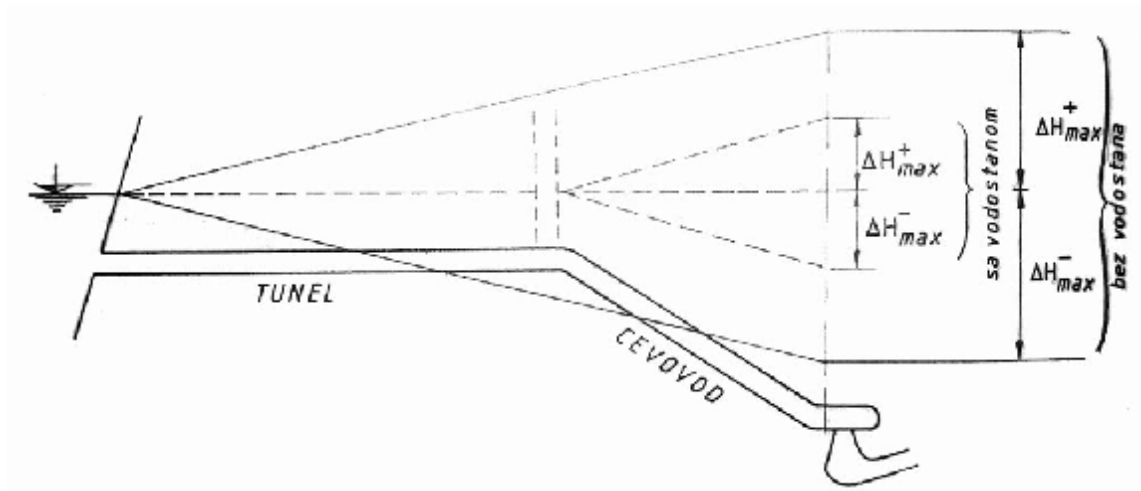
- Обичан, цилиндрични водостан,
- Водостан са пригушивачем,

- Једносмерни водостан,
- Диференцијални водостан,
- Затворени водостан,
- Водостан са коморама



Слика 2.2.1: Типови водостана

Када у систему не би било водостана у цевоводу и тунелу би приликом маневра турбине дошло до великог притиска услед хидрауличког удара, тако да се и тунел и цевовод штите од великог притиска водостаном



Слика 2.2.2: Шема хидрауличког удара у систему са и без водостана

2.3 Склоп модел - водостан - мерење нивоа

Водостан је комплексан хидротехнички објекат и због тога се често праве физички и нумерички модели. Физички модел водостана прави се ради што бољег сагледавања рада стварног водостана пошто је сама изградња једног тако великог објекта велика инвестиција. На основу физичког модела калибрише се математички модел водостана па тако оба модела у садејству могу дати више информација. Када правимо физички модел први корак је колико тај модел смањити и коју сличност примењивати. Пошто је модел мањих димензија у односу на водостан у природи то значи да мерења на моделу треба урадити што је тачније могуће. Због свега тога овде се тежи да капацитивна сонда за ниво приказује што тачнија мерења нивоа кроз време. У овом раду израђен је модел водостан са пригушивачем (слика 2.3.1) где се може приметити и капацитивна сонда за мерење нивоа.



Слика 2.3.1: Модел водостана и капацитивна сонда

3

Модел водостана са пригушивачем

Модел водостана требало је урадити тако да се уклопи у постојеће стање хидрауличке лабораторије уз поштовање граничних услова. За усвојени пречник водостана требало је подесити осцилације нивоа у дозвољеним границама. Због тога се приступило мерењу протицаја ради налажења брзине воде у тунелу и губитка на трење у тунелу а притом израчунавању максималне амплитуде без трења $Z_* = V_{\text{tun}} \sqrt{(L \cdot F_{\text{tun}} / g \cdot F_{\text{vod}})} = 0.582 \text{ m}$ и потом стварне амплитуде при наглном затварању прочитано са графика (Бранислан Ђорђевић, коришћење водних снага: објекти хидроелектрана, 1989, страна 195). За изабран пречник водостана варијанта са обичним водостаном није задовољавао те параметре (вода би при наглном затварању би излазила из водостана), рачунање минималне амплитуде је изостављено јер обичан водостан није задовољавао максималну амплитуду и потом је усвојена варијанта водостана са пригушивачем.

Следећи степен израде модела је налажење отвора пригушивача тако да се задовоље границе осцилација тј амплитуде осциловања. Ако погледамо график (Бранислан Ђорђевић, коришћење водних снага: објекти хидроелектрана, 1989, страна 201) на кривој с-с, која даје оптималне вредности пригушења за која се још увек ударни притисак не преноси у тунел, за дефинисано $\Delta h_{\text{tun}} / Z_* = 0.171$ прочитамо $Z_{\text{max}} / Z_* = 0.58$ потом из односа нађемо $Z_{\text{max}} = 0.34 \text{ m}$ и $r = 0.8$ на основу овога нађен је коефицијент локалног губитка на пригушивачу $r = \Delta h_p / Z_* \Rightarrow \Delta h_p = 0.466$ $\xi = \Delta h_p \cdot 2 \cdot g / v^2$ $\xi = 27.47$ тј ако се срачуна у односу на брзину у водостану $\xi = 0.72787$. Требало је наћи отвор пригушивача да би се правио одговарајући ξ , одговор се налази у књизи (I. E. Idelchik, HANDBOOK OF HYDRAULIC RESISTANCE, 1989, страна 169, прилог 1). Усвојени максимални пречник пригушивача је 6.00 cm. Приликом маневра наглог отварања, треба водити рачуна да се табласти затварач несме скроз отварати, пошто би ушао ваздух у тунел што никако није добро по агрегат јер би ваздух дошао у цевовод. При таквом маневру (полуотварању) минимална амплитуда би задовољила

задате критеријуме. Приликом израде сужења остављена је могућност промене отвора сужења на мање отворе што би још више повећало утицај хидрауличког удара на тунел и као такво проширење остављено је због наредних истраживача да би испитивали хидраулички удар у тунелу. Изглед водостана се може видети на прилогу 2

4

Израда антене сонди и детаљна калибрација са анализом стабилности и тачности

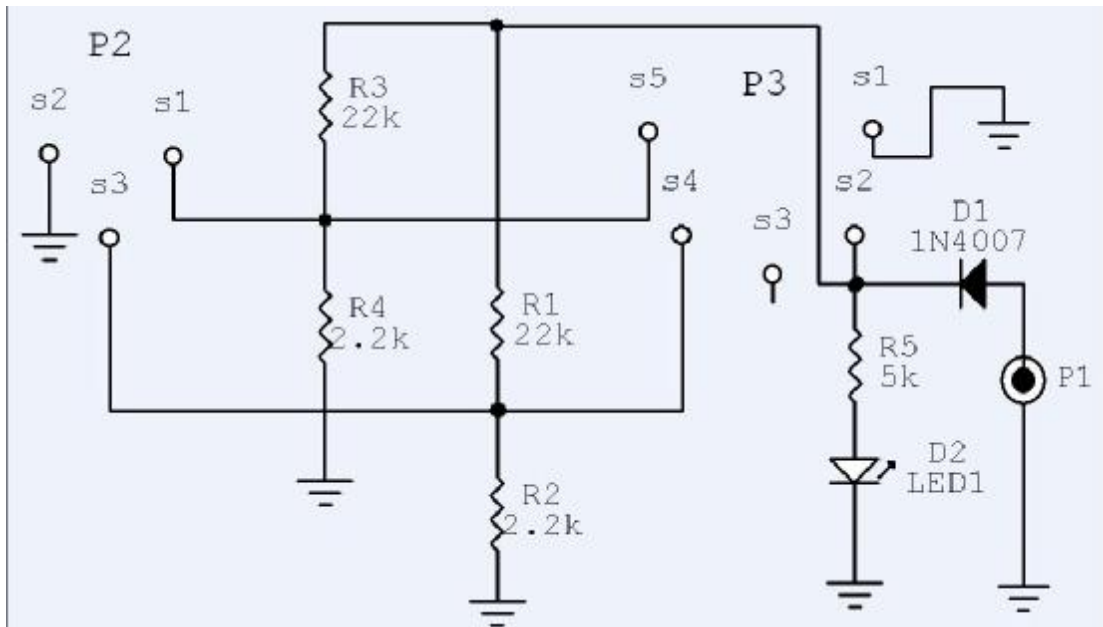
Пре било каквих мерења морамо се посветити калибрацији сонди пошто су све сонде, осим мерне игле, које користимо из групе електричних мерних претварача. За мерења напона, струје и фреквенције приликом калибрације коришћен је мерни уређај DATATAKER DT500 Аустралијске компаније Data Electronics.

4.1 Израда и калибрација Капацитивне сонда за мерење нивоа

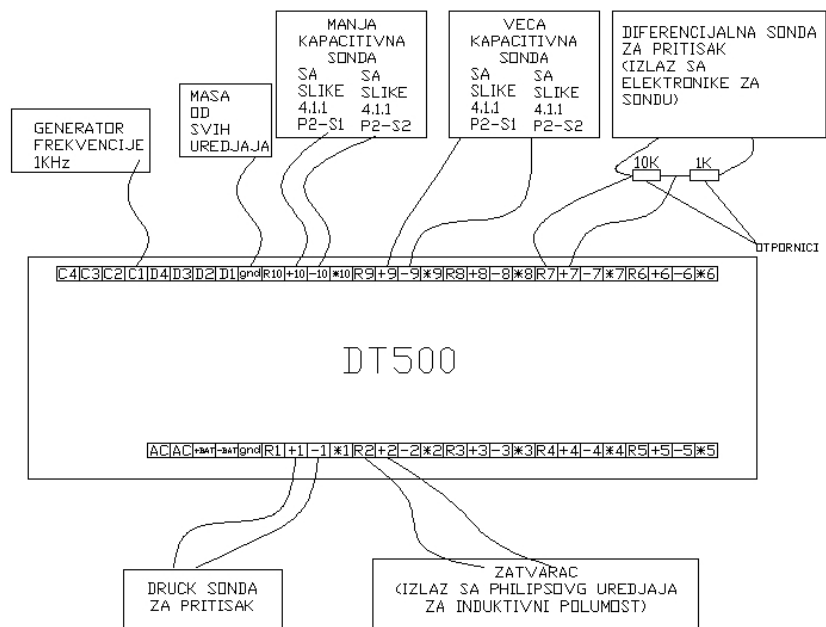
Пошто је већ постојала једна антена и то мања која је испоручена уз сонду (Свет Инструмената) приступљено је изради још једне копије антене. За израду антене коришћен је нерђајући челик (прохром). Антена се састоји из три дела цев од прохрома 26.9x2 дужине 840 mm, холендера DN20I/A 3/4" и језгра антене од челичне шипке $\phi 5$ на коју је навучена тефлонска изолација. На самом врху антене мора се ставити водоотпорни чеп како би сонда уопште имала функцију. Капацитивна сонда је направљена из 2 растављива дела и то су мерна глава и антена. Мерне главе обезбедио је произвођач мерне опреме Миле Цитковац.

Из мерне главе добија се фреквенција у импулсима али је излаз из сонде са слободним колектором и требало је подесити напон приликом мерења зато што логер који је коришћен може максимално да прими +2.5V и због тога је направљен додатак (слика 4.1.1) како би се сонда могла привезати на логер. Напон на конектору P1 је једносмеран +12V а ,напон на излазу је у пику до +0.5V (P2-s1 или P2-s1 у зависности од повезивања). Команда за читавање фреквенције у зависности од канала је xF, где је x број

канала. На слици 4.1.2 приказана је шема повезивања логер на мерне сонде.



Слика 4.1.1: Веза капацитивна сонда логер



Слика 4.1.2: Шема везивања логера

4.1.1 Капацитивна сонда бр.1 (мања сонда)

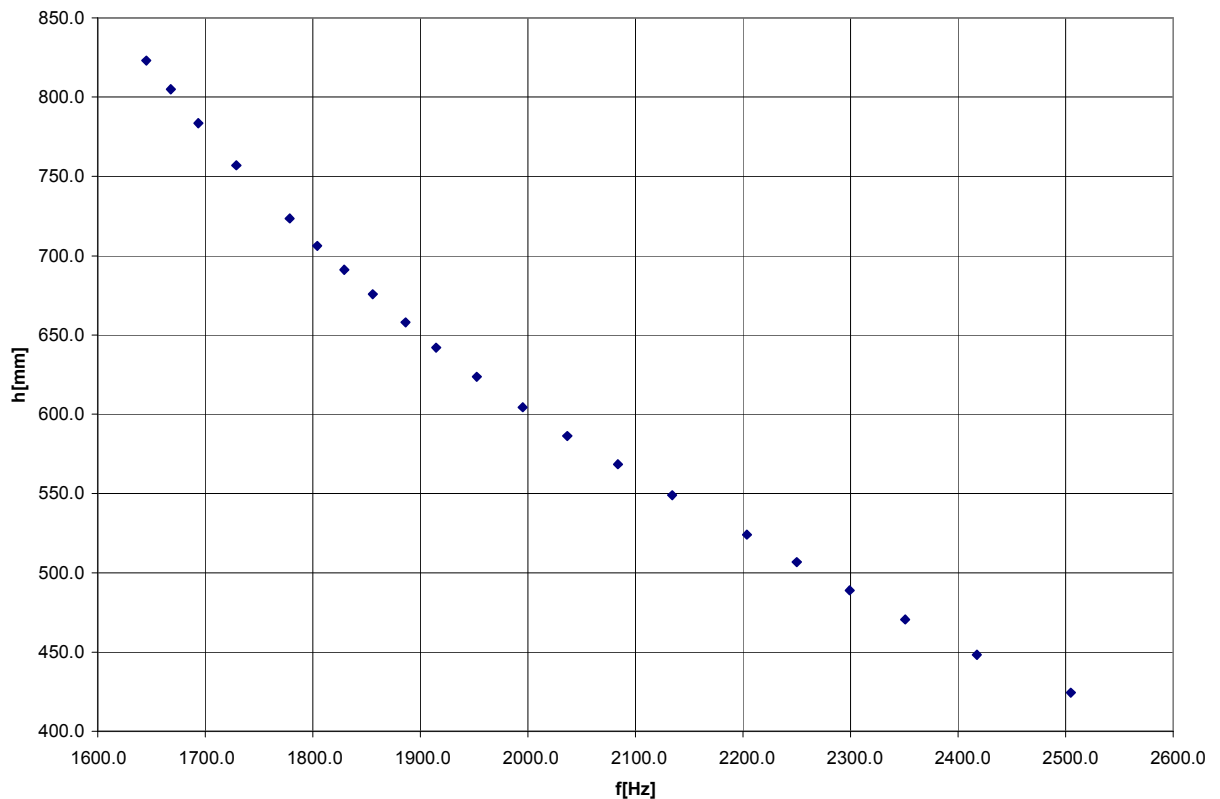
Капацитивна сонда бр. 1 тј мања сонда има распон мерења до 400mm. На самој антени су обележена места на мађусобном растојању од 10 cm.

4.1.1.1 Калибрација f-h при константној температури

Као мерно место искоришћен је водостан са пригушивачем тако што се отвор за пригушивач затворио затварачем. Као редувантно мерење коришћена је мерна игла тачности 0.2 mm док је за динамичке промене коришћена магнетно рестриктивна сонда. При константној температури мерен је однос ниво-фреквенција, приликом експеримента ниво воде се спуштао али се читање извршавало са временским кашњењем како би се вода што више смирила и читања чинила тачнијим. Установљена температура приликом експеримента кретала се у опсегу од 20.32 до 20.79 °C са средњом вредношћу 20.54 °C као што је приказано у табели 4.1.1.1.1 на графику (слика 4.1.1.1.2) приказан је однос фреквенција-ниво при константној температури

t_{mer}	f_{mer}	h_{mer}
°C	Hz	mm
20.32	1645.2	823.2
20.33	1668.0	805.0
20.34	1693.6	783.5
20.36	1728.8	757.1
20.43	1778.5	723.4
20.47	1804.0	706.3
20.55	1829.2	691.0
20.60	1855.8	675.7
20.64	1886.0	658.0
20.72	1914.6	642.0
20.49	1952.3	623.7
20.52	1995.2	604.3
20.50	2036.6	586.3
20.64	2083.9	568.5
20.61	2134.2	548.9
20.71	2203.6	524.0
20.71	2249.9	506.7
20.79	2299.0	489.0
20.55	2351.0	470.5
20.57	2417.4	448.3
20.55	2504.9	424.4

Табела 4.1.1.1.1



Слика 4.1.1.1.2: Мерења фреквенција-ниво

Ако узмемо једначину $h = \left(\left(\frac{1}{f^2} - p_0 \right) * p_1 \right) + p_2$ можемо

калибрисати мерене вредности и тако их претварати у дубину где су константе:

- $p_0 = \frac{1}{f^2}$ при минималном нивоу
- $p_1 = \frac{h - p_2}{\frac{1}{f^2} - p_0}$ при максималном нивоу
- p_2 минимални ниво

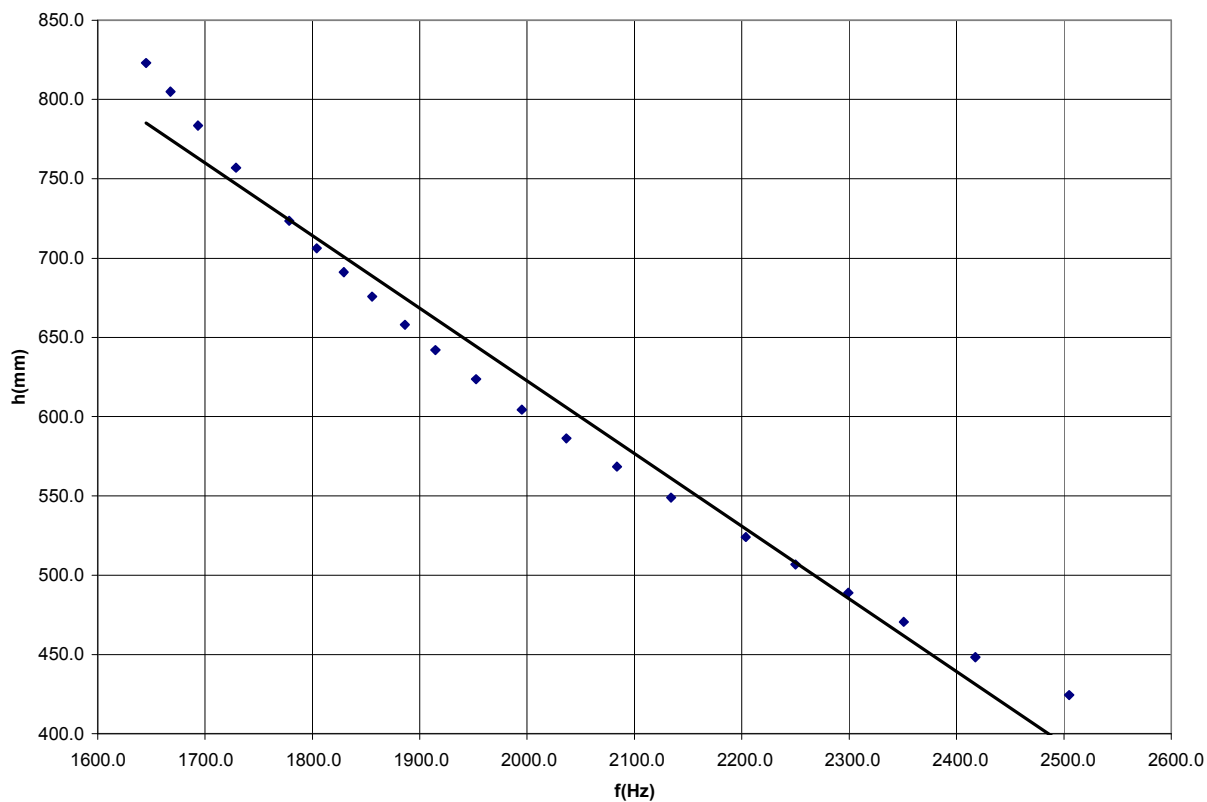
На основу ове једначине добија се апроксимација нивоа са грешком од 11.4 mm tj 2.86 % ако расподелимо по целој скали, ова апроксимација је приказана у табели 4.1.1.1.3

h_{mer}	$h_{\text{rac.fabricko}}$	greska fab
mm	mm	mm
823.2	823.2	0.0
805.0	804.2	0.8
783.5	783.7	-0.2
757.1	757.0	0.1
723.4	722.0	1.4
706.3	705.2	1.1
691.0	689.2	1.8
675.7	673.1	2.6
658.0	655.5	2.5
642.0	639.7	2.3
623.7	619.9	3.8
604.3	598.7	5.6
586.3	579.5	6.8
568.5	559.0	9.5
548.9	538.6	10.3
524.0	512.8	11.2
506.7	496.9	9.8
489.0	481.0	8.0
470.5	465.3	5.2
448.3	446.7	1.6
424.4	424.4	0.0

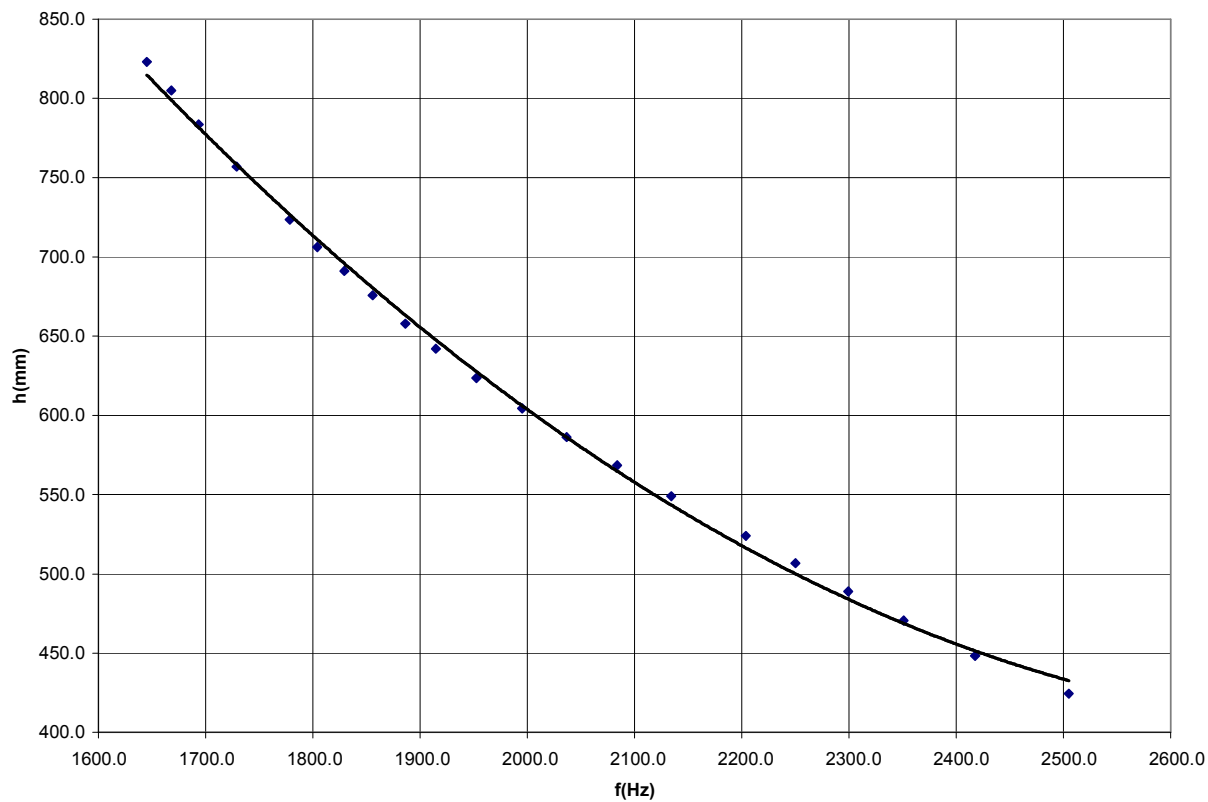
greska 11.4
greska(%) 2.86

Табела 4.1.1.1.3: Апроксимација фабричком функцијом

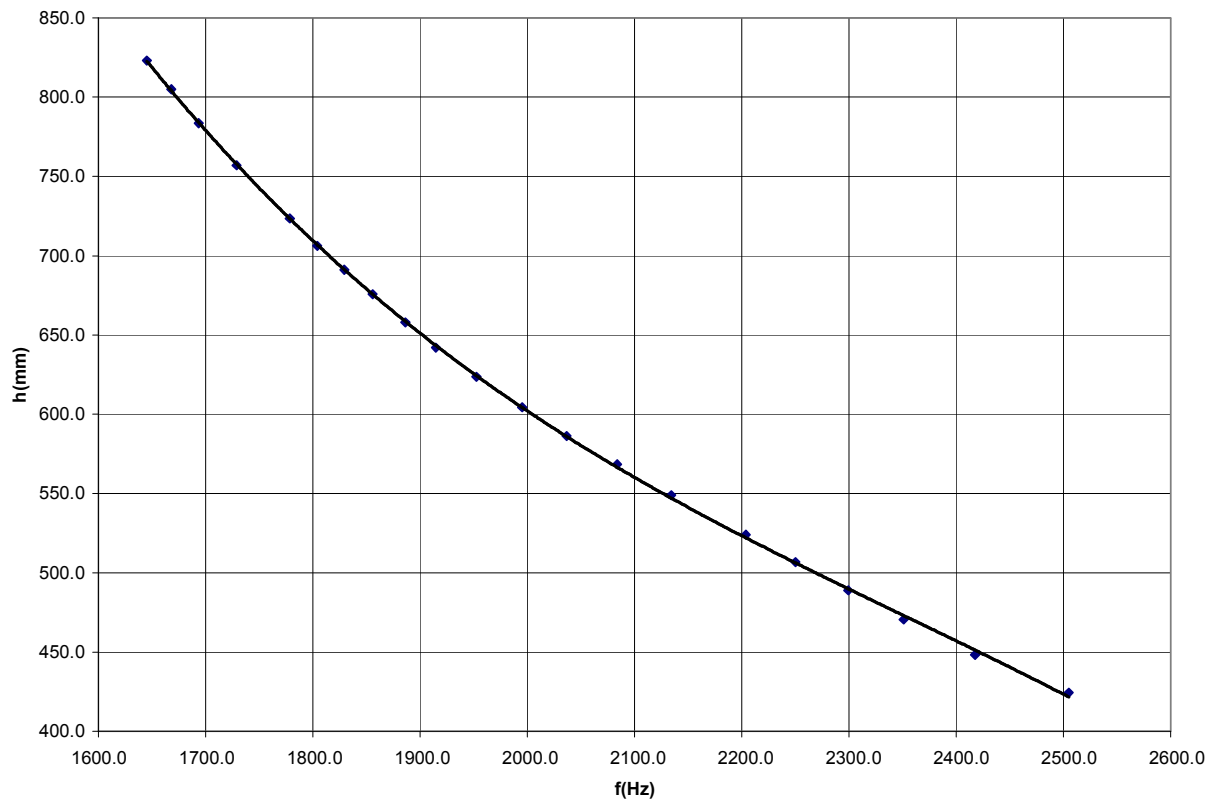
Сада се поставља питање какву апроксимацију поставити да би се добиле мање грешке. Тако да је испробавана линеарна (слика 4.1.1.1.4), квадратна (слика 4.1.1.1.5) и кубна (слика 4.1.1.1.6) зависност. Кубна зависност је показала најбоље резултате поклапања и требало је испитати грешке у односу на мерење и апроксимацију што је и приказано у табели 4.1.1.1.7



Слика 4.1.1.1.4: Линеарна зависност фреквенција ниво



Слика 4.1.1.1.5: Квадратна зависност фреквенција ниво



Слика 4.1.1.1.6: Кубна зависност фреквенција ниво

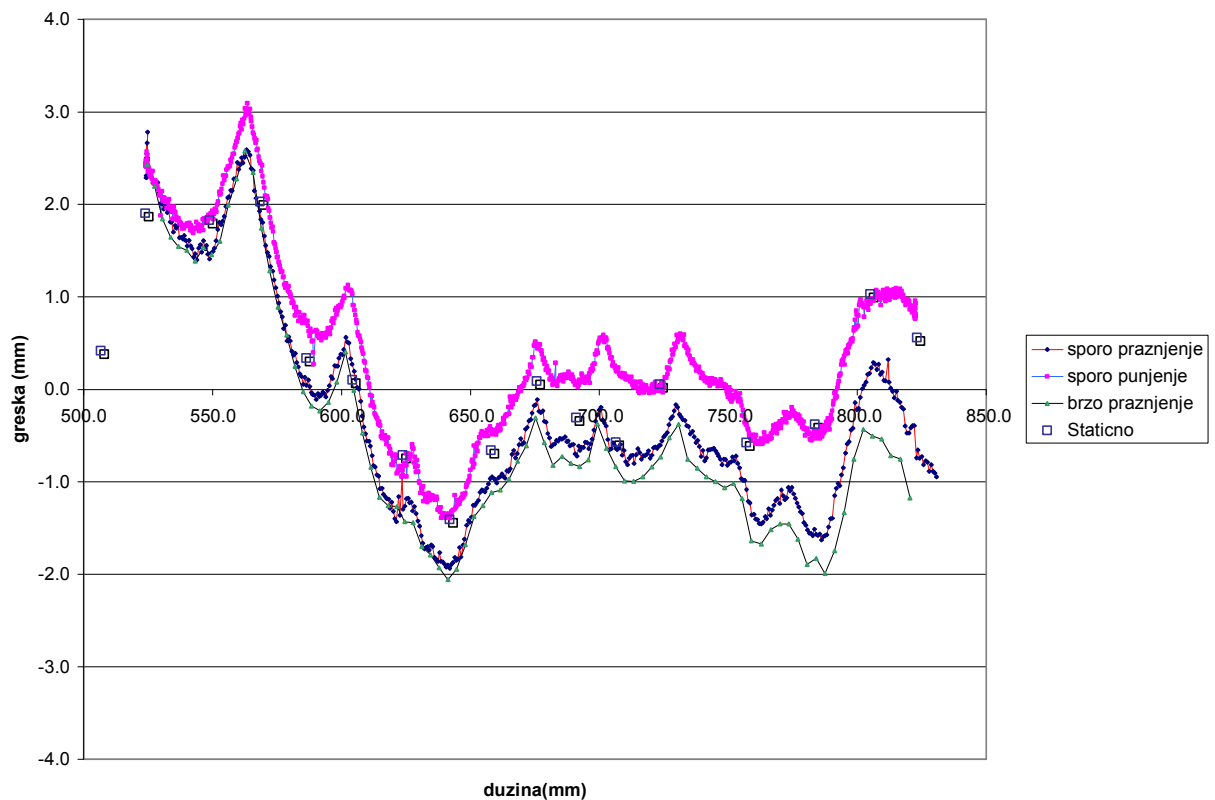
h_{mer}	$h_{rac.fabricko}$	greska fab	$h_{rac. Pol}$	greska pol
mm	mm	mm	mm	mm
823.2	823.2	0.0	822.6	0.6
805.0	804.2	0.8	804.0	1.0
783.5	783.7	-0.2	783.9	-0.4
757.1	757.0	0.1	757.7	-0.6
723.4	722.0	1.4	723.3	0.1
706.3	705.2	1.1	706.9	-0.6
691.0	689.2	1.8	691.3	-0.3
675.7	673.1	2.6	675.6	0.1
658.0	655.5	2.5	658.7	-0.7
642.0	639.7	2.3	643.4	-1.4
623.7	619.9	3.8	624.4	-0.7
604.3	598.7	5.6	604.2	0.1
586.3	579.5	6.8	586.0	0.3
568.5	559.0	9.5	566.5	2.0
548.9	538.6	10.3	547.1	1.8
524.0	512.8	11.2	522.1	1.9
506.7	496.9	9.8	506.3	0.4
489.0	481.0	8.0	490.0	-1.0
470.5	465.3	5.2	473.0	-2.5
448.3	446.7	1.6	451.3	-3.0
424.4	424.4	0.0	421.6	2.8

greska 11.4 greska 5.8
greska(%) 2.86 greska(%) 1.44

Табела 4.1.1.1.7: Грешка апроксимације

Показало се да кубна парабола даје мање грешке, али их је требало још смањити, ако је уопште то и могуће. Поставља се питање може ли се направити lookup табела из које би се читавале вредности, а ако их нема у табелама радила интерполација. Тако да је усвојена група од по четири тачке са којима је нађен полином трећег степена. Овакав вид апроксимације се урадио зато што је понављањем мерења установљено да се грешка понаља. Статичком мерењу нивоа додата је и динамичка компонента кретања воде тако што је магнетно рестриктивна сонда служила као мерна игла при таквом испитивању кретања течности. При динамичком испитивању

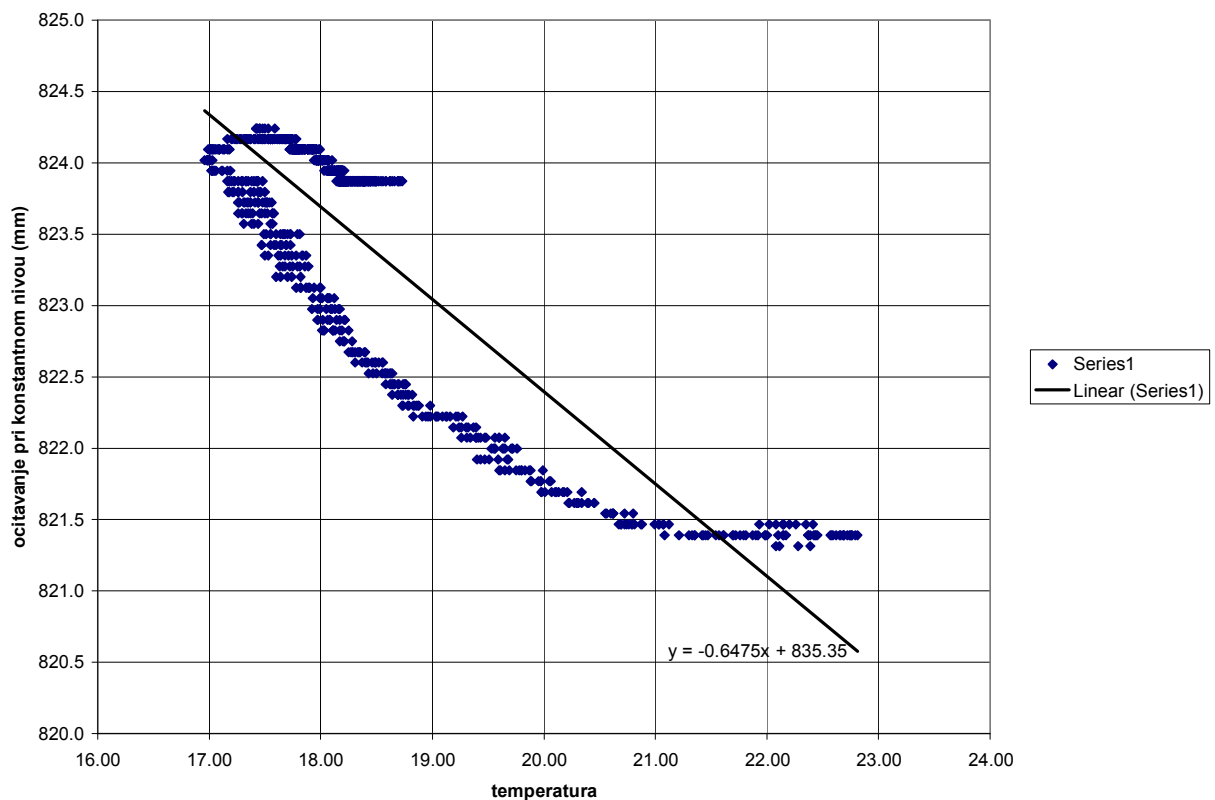
коришћене су две брзине кретања воде и мерено је у два правца течење на горе и ка доле. На слици 4.1.1.1.8 може се видети динамички утицај капиларности и делимично сондиног система пошто и сама сонда делује као систем (пример једног таквог система је намерно одвајање бунара за мерење нивоа у реци како би се пригушиле осцилације). Сам утицај капиларности зависи од запрљаности сонде. Ова појава би се требала испитати у неким од наредних истраживања и тако би се направила динамичка веза како би се “можда” и на том пољу резултати побољшали. На слици 4.1.1.1.8 сонда је апроксимирана полиномом трећег степена, пошто при таквој апроксимацији видимо поновљиве грешке можемо уочити да би се сонда могла апроксимирати lookup табелом. Као таква апроксимација остао би нам утицај динамике воде и грешка би зависила од динамике. Ове поновљиве грешке јављају се због не савршености израде антене тако да би савет за израду наредне антене био да се са што је већом прецизношћу израђује пречник антене а дебљине тefлона буде што више униформнија.



Слика 4.1.1.1.8: Утицај капиларности

4.1.1.2 Утицај температуре при константном нивоу

Када разматрамо утицај температуре на капацитивну сонду требамо нагласити да велики утицај има диелектрична константа која зависи од температуре. У поглављу о општим карактеристикама капацитивне сонде већ је наглашено да се диелектрична константа мења линеарно у односу на температуру. Тако закључујемо да и зависност температуре на сонду мора бити линеарна, и као таква апроксимација може се видети на слици 4.1.1.2.1. где је приказана зависност грешке приказивања нивоа у односу на температуру. Хистерезис који се јавља од утицаја масе главе сонде која спречава брзе промене температуре у самој глави, тако закључујемо да температура има утицај и на саму главу сонде. У овом раду није тражена зависност температуре у мерној глави и читавању пошто није било могуће поставити мерно тело у саму главу. Овакав оглед требало је урадити за већи опсег температуре што је и ограничење овог огледа



Слика 4.1.1.2.1: Утицај темературе при константном нивоу

4.1.1.3 Збирни утицаји

Ако користимо lookup табеле смањили би смо грешку. Грешка при динамичком утицају имала би вредност у зависности од брзине кретања течности тј по мојим мерењима око 1mm. Грешка при промени температуре кретала би се у опсегу $\pm 2\text{mm}$. Када би занемарили грешку приликом апроксимације тј ако би што је могуће тачније калибрисали сонду при константној температури и користили lookup табеле, укупна грешка мерења нивоа кретала би се до 5mm. Ако грешку од 5mm поделимо по целој скали добили би смо 1.25 % тачности и при динамичким утицајима. Ако занемаримо динамичке утицаје и посматрамо само грешку од промене температуре добили би тачност мерења од 1% што је утицај мерне главе па би требало мерити и температуре у глави сонде што овде није било могуће (такав експеримет и додатна калибрација би требало да побољшају одступање).

4.1.2 Капацитивна сонда бр.2 (већа сонда)

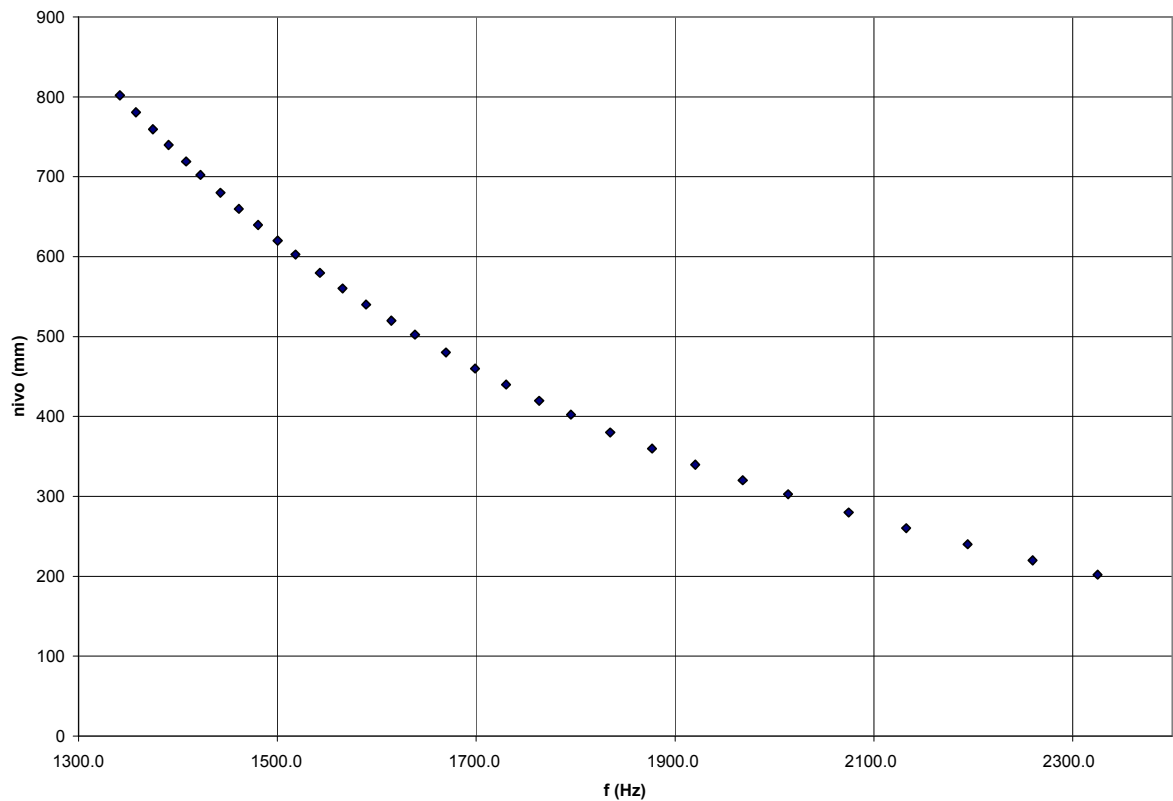
Капацитивна сонда бр. 2 тј већа сонда има опсег мерења 600mm што је за 200mm више од мање капацитивне сонде (обележене као сонда бр.1). На самој антени су обележена места на мађусобном растојању од 10 cm.

4.1.2.1 Калибрација f-h при константној температури

Као мерно место искоришћен је водостан са пригушивачем тако што се отвор за пригушивач затворио затварачем. Као редувантно мерење коришћена је мерна игла тачности 0.2 mm. При константној температури мерен је однос ниво-фреквенција, приликом експеримента ниво воде се спиштао али се читање извршавало са временским кашњењем како би се вода што више смирила и читања чинила тачнијим. Установљена температура приликом експеримента кретала се око 22 °C. У табели 4.1.1.2.1 и на графику (слика 4.1.1.2.2) приказан је однос фреквенција-ниво при константној температури.

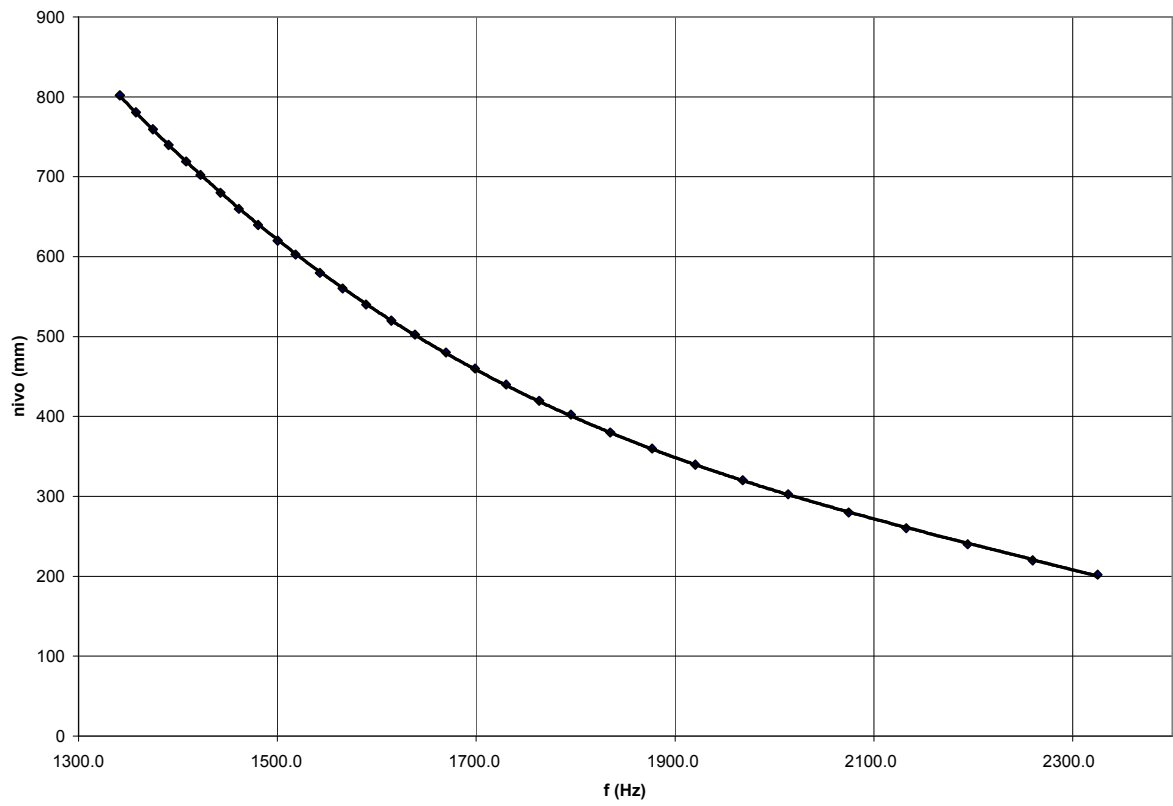
f_{mer}	h_{mer}
Hz	mm
1341.5	801.8
1357.8	780.6
1374.8	759.8
1391.0	739.7
1408.1	719.5
1422.7	702.6
1443.0	680.0
1461.5	660.0
1480.6	640.0
1500.5	620.0
1518.4	602.5
1542.8	580.0
1565.9	560.0
1589.4	540.0
1615.0	520.0
1638.5	502.3
1669.5	480.0
1699.1	459.9
1730.2	440.0
1763.6	420.0
1795.2	402.3
1835.0	380.0
1876.8	360.0
1920.5	340.0
1968.4	320.0
2013.8	302.5
2074.6	280.0
2132.5	260.0
2194.3	240.0
2259.8	220.0
2325.0	202.1

Табела 4.1.1.2.1



Слика 4.1.1.2.2: Мерења фреkwенција-ниво

Као што је већ урађено са мањом капацитивном сондом бр.1 и овде ће се користити полином трећег степена. Кубна зависност (слика 4.1.1.2.3) је показала најбоље резултате поклапања и требало је испитати грешке у односу на мерење и апроксимацију што је и приказано у табели 4.1.1.2.4



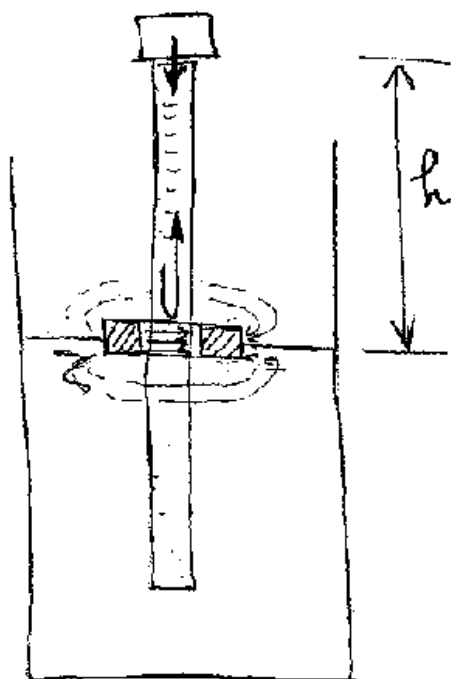
Слика 4.1.1.2.3: Кубна зависност фреквенција ниво

f_{mer}	h_{mer}	$h_{rac. Pol}$	Greska polinom	$h_{rac.fabricko}$	greska fabricko
Hz	mm	mm	mm	mm	mm
1341.5	801.8	801.05	0.75	801.80	0.00
1357.8	780.6	780.18	0.42	780.35	0.25
1374.8	759.8	759.01	0.79	758.78	1.02
1391.0	739.7	739.47	0.23	739.02	0.68
1408.1	719.5	719.31	0.19	718.76	0.74
1422.7	702.6	702.65	-0.05	702.11	0.49
1443.0	680	680.16	-0.16	679.77	0.23
1461.5	660	660.40	-0.40	660.24	-0.24
1480.6	640	640.71	-0.71	640.87	-0.87
1500.5	620	620.88	-0.88	621.42	-1.42
1518.4	602.5	603.64	-1.14	604.56	-2.06
1542.8	580	581.04	-1.04	582.50	-2.50
1565.9	560	560.66	-0.66	562.63	-2.63
1589.4	540	540.82	-0.82	543.29	-3.29
1615.0	520	520.18	-0.18	523.14	-3.14
1638.5	502.3	502.07	0.23	505.42	-3.12
1669.5	480	479.55	0.45	483.30	-3.30
1699.1	459.9	459.19	0.71	463.20	-3.30
1730.2	440	439.13	0.87	443.25	-3.25
1763.6	420	418.94	1.06	423.00	-3.00
1795.2	402.3	400.96	1.34	404.81	-2.51
1835.0	380	379.91	0.09	383.27	-3.27
1876.8	360	359.50	0.50	362.14	-2.14
1920.5	340	339.75	0.25	341.45	-1.45
1968.4	320	319.85	0.15	320.39	-0.39
2013.8	302.5	302.35	0.15	301.77	0.73
2074.6	280	280.60	-0.60	278.72	1.28
2132.5	260	261.23	-1.23	258.57	1.43
2194.3	240	241.46	-1.46	238.82	1.18
2259.8	220	220.88	-0.88	219.64	0.36
2325.0	202.1	200.05	2.05	202.10	0.00
		greska (mm)	3.51		4.73
		greska(%)	0.59		0.79

Табела 4.1.1.2.4

4.2 Магнетно-рестриктивна сонда за мерење нивоа

Магнетно-рестриктивна сонда је влике тачности, око 0.05%. Принцип магнетно-рестриктивне методе је такав да се емитује импулс који путује дуж челичне шипке - одбија се на месту где стални магнет у пловку прави кружно магнетно поље па се мери време путовања импулса (слика 4.2.1)



Слика 4.2.1: Магнетно-рестриктивни претварач нивоа

Магнетно-рестриктивна сонда има линеаран однос дубине и струје (која је мерена) или напона. Калибрација сонде урађена је на основу две тачке (табела 4.2.2) и добијена зависност тј вредност коефицијената линеарне зависности (табела 4.2.3).

$h(\text{mm})$	856.2	523.8
$I(\text{mA})$	5.0344	19.144

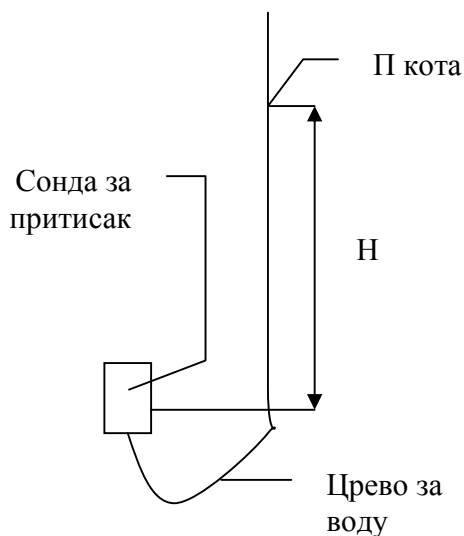
Табела 4.2.2: Однос дубина струја

a	-23.5584
b	974.8

Табела 4.2.3: Кофицијенти калибрације

4.3 Калибрација сонде за притисак

Калибрација Druck-ове сонде за притисак вршена је на примерку сонде за притисак бр. 5 као што је приказано у табели 4.3.2. Скуца инсталације приказана је на слици 4.3.1 Корелациона зависност је линеарна па су зато и тражени коефицијенти те зависности. Мерења су обављена тако сто се мењала висина притиска и бележио пар напон-висина (табела 4.3.3). Мерења нису почета од малих висина јер сонде за притисак нису линеарне на том делу. Сонда је приликом калибрисања била прикључена на константан напон од 10 V.



Слика 4.3.1: Скица инсталације за калибрацију

Sonda:	5	broj
range:	75	mbar

Табела 4.3.2: примерак сонде и опсег

Redni broj	U (mV)	Hmer (cm)	Δ Hrač (cm)	$\varepsilon_{\text{TREN}}$ (%)
1	8.41	39.0	39.04	0.11
2	9.48	43.8	43.84	0.10
3	10.56	48.7	48.69	-0.02
4	11.63	53.5	53.49	-0.01
5	12.65	58.2	58.07	-0.22
6	13.73	62.9	62.92	0.03
7	14.78	67.7	67.63	-0.11
8	15.85	72.4	72.43	0.04
9	16.89	77.0	77.10	0.13
10	17.89	81.6	81.58	-0.02

Табела 4.3.3: Мерени однос напон-висина и рачунати

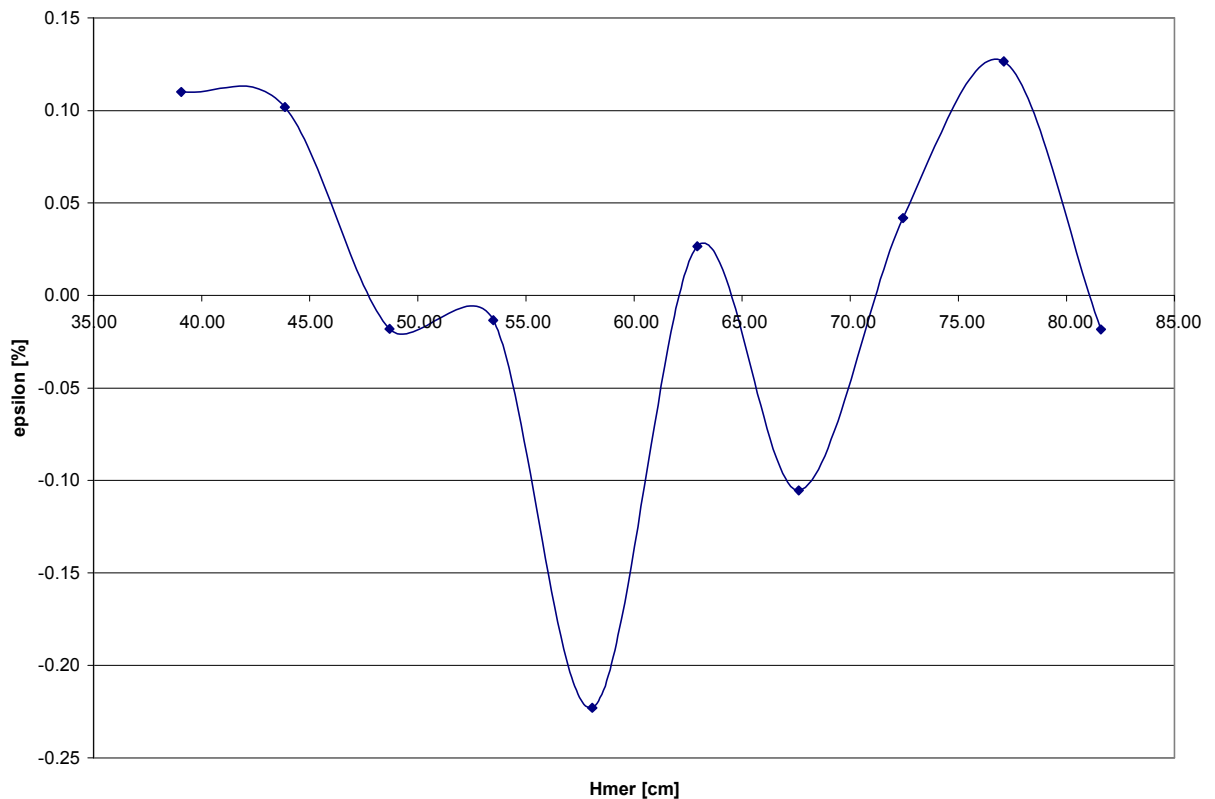
На крају су се нашли калибрациони коефицијенти који су приказани у табели 4.3.4. Тако да једначина за добијање висинске разлике гласи $H=A*U+B$ или за сонду бр.5

$$H(\text{cm})=4.49*U(\text{mV})+1.30$$

A	4.49
B	1.30

Табела 4.3.4: коефицијенти калибрације

На слици 4.3.5 приказана је тренутна грешка при мерењу у односу на линеарну апроксимацију.



Слика 4.3.5: тренутна грешка сонде за мерење притиска

4.4 Калибрација диференцијалне сонде за притисак

Диференцијална сонда за притисак има могућност промене мембране, очекивани опсег мерења је око 10cm воденог стуба тако да је изабрана мембрана од 1psi=70.3 cm воденог стуба. Сонда је прикључена на уређај који прави напон на излазу пошто сонда ради на принципу магнетне индукције. Тај напон је опсега до 10V па је због опсега логера (опсег $\pm 2.5V$) направљен аутенатор у односу 0.1063 и тако мерено при калибрацији.

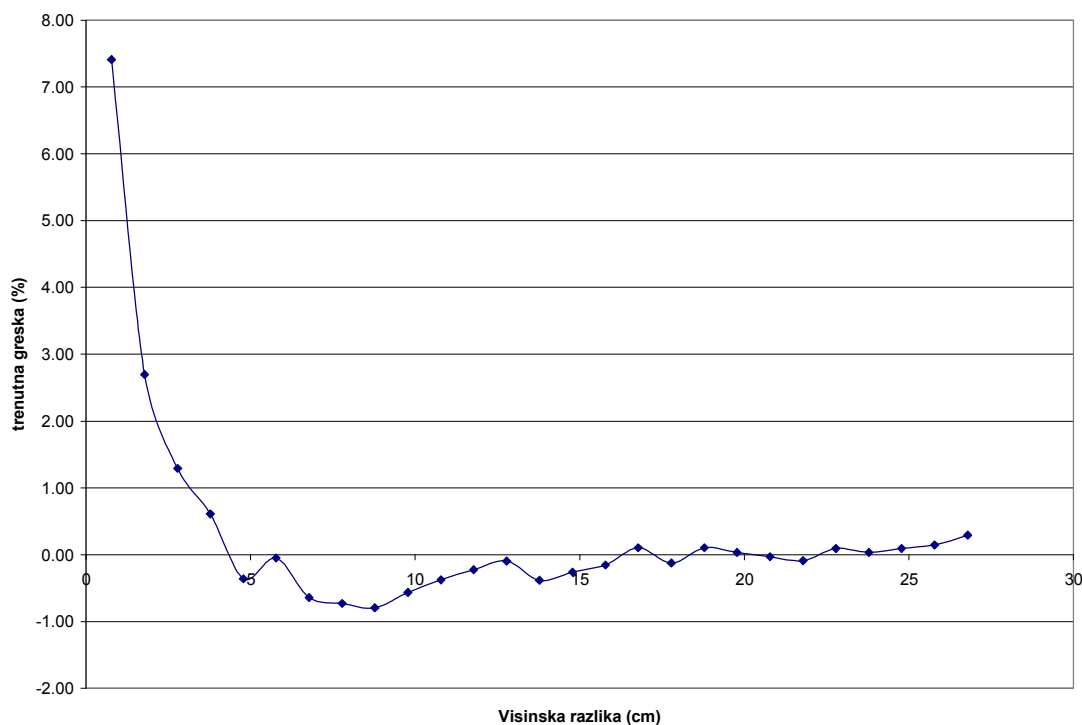
Методом најмањих квадрата нађена је линеарна зависност и добијени коефицијенти који су приказани у табели 4.4.1. Тако да једначина за добијање висинске разлике гласи $H=A*U+B$. У табели 4.4.2 приказане су мерене величине, рачунате величине и грешка. Зависност грешке по дубини приказана је на слици 4.4.3

A	0.0274
B	-2.3377

Табела 4.4.1: Коefицијенти линеарне зависности

напон	H _{мер}	H _{рас}	$\varepsilon_{\text{TREN}}$ (%)
mV	cm	cm	%
89	0	0.10	100.00
116	0.78	0.84	7.41
152	1.78	1.83	2.70
188	2.78	2.82	1.29
224	3.78	3.80	0.61
259	4.78	4.76	-0.36
296	5.78	5.78	-0.05
331	6.78	6.74	-0.64
367	7.78	7.72	-0.73
403	8.78	8.71	-0.80
440	9.78	9.72	-0.57
477	10.78	10.74	-0.38
514	11.78	11.75	-0.22
551	12.78	12.77	-0.09
586	13.78	13.73	-0.38
623	14.78	14.74	-0.26
660	15.78	15.76	-0.15
698	16.78	16.80	0.11
733	17.78	17.76	-0.13
771	18.78	18.80	0.10
807	19.78	19.79	0.03
843	20.78	20.77	-0.03
879	21.78	21.76	-0.09
917	22.78	22.80	0.10
953	23.78	23.79	0.04
990	24.78	24.80	0.09
1027	25.78	25.82	0.15
1065	26.78	26.86	0.30

Табела 4.4.2: Приказ апроксимације и грешке



Слика 4.4.3: Зависност грешке по разлици воденог стуба

4.5 Калибрација отворености табластог затварача

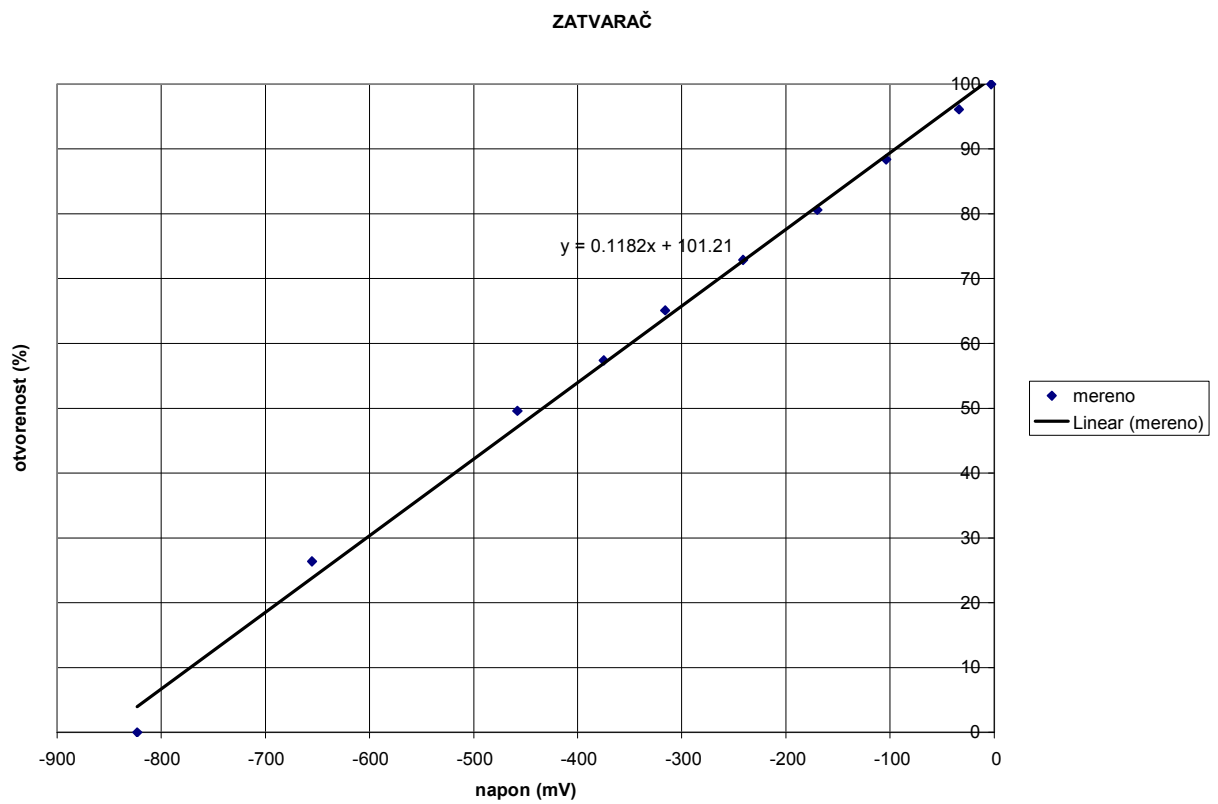
На табласти затварач причвршћена је магнетно-индуктивна сонда за мерење положаја. Магнетно-индуктивна сонда у себи има индуктивни полумост који у зависности од положаја мења индуктивност. На Philips-ов претварач повезује се сонда, а на излазу из уређаја добијамо напон опсега $\pm 1\text{ V}$ и као такав меримо га логером. У табели 4.5.2 приказан је однос напона и отворености табластог затварача као и на слици 4.5.3. Методом најмањих квадрата добијени су коефицијенти линеарне зависности приказани у табели 4.5.1.

A	0.1182
B	101.21

Табела 4.5.1: Коефицијенти линеаризације

Umer	Hmer	OTVORENOST
mV	cm	%
-823	3.1	0
-655	6.5	26
-458	9.5	50
-375	10.5	57
-316	11.5	65
-241	12.5	73
-170	13.5	81
-104	14.5	88
-34	15.5	96
-3	16	100

Табела 4.5.1: однос напон-отвореност

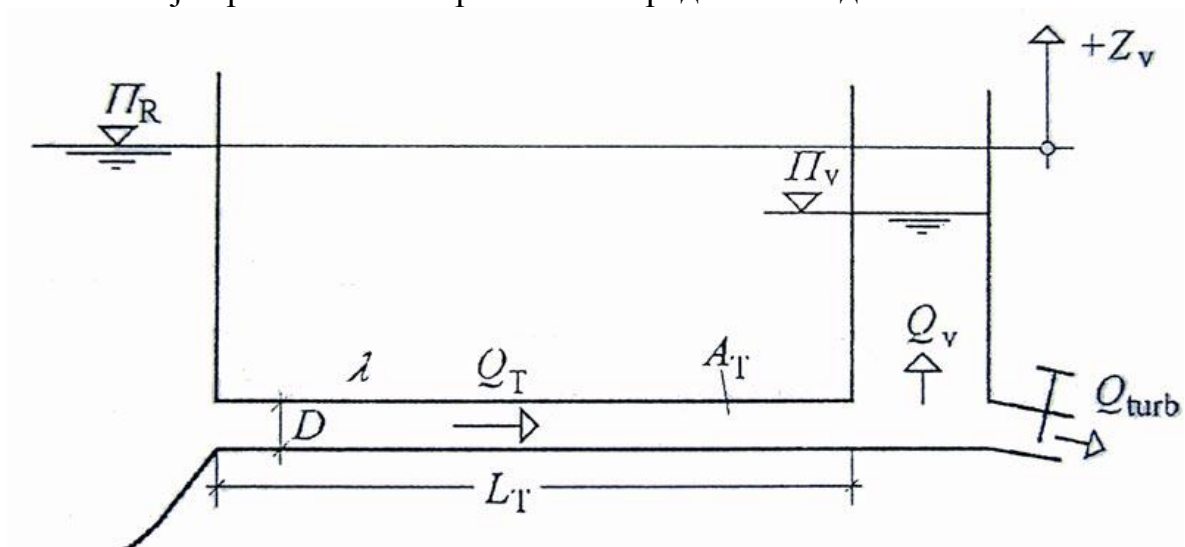


Слика 4.5.2: зависност отвореност-напон

5

Израда математичког модела водостана

Ако погледамо основну шему: језеро-тунел-водостан, са везом на цевоводу под притиском (слика 5.1). Претпоставља се да се све промене у раду турбине тренутно преносе до водостана, што је приказано затварачем непосредно иза водостана.



Слика 5.1: Основна шема водостана

Код провере функционисања водостана и за грубо одређивање димензија и положаја водостана, интересантна су два екстремна случаја (слика 5.4) - тренутно затварање предтурбинског затварача при максималном протицају, и нагло повећање протицаја кроз турбину.

Уз претпоставке да пијезометарске коте на почетку и на крају тунела одговарају нивоима воде у језеру Π_R , и у водостану Π_V , динамичка једначина за воду у тунелу гласи:

$$\frac{dQ_T}{dt} = \frac{g \cdot A_T}{L} \cdot (\Pi_R - \Pi_V) - \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D^3} \cdot Q_T \cdot |Q_T|$$

Q_T је протицај кроз тунел, A_T је површина попречног пресека тунела, D је пречник тунела и L дужина тунела.

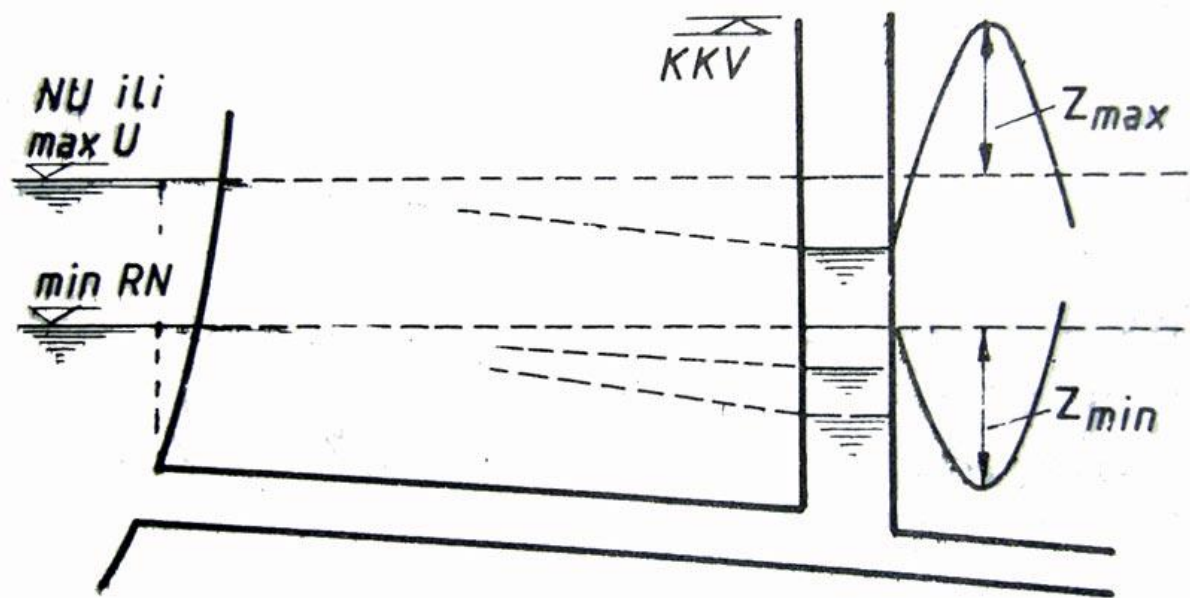
Једначина континуитета за чвор у коме се налази водостан гласи :

$$Q_T = Q_V + Q_{\text{turb}} \quad (5.2)$$

Где је Q_V , протицај воде која улази у водостан, а Q_{turb} протицај који иде према турбини. Промена нивоа воде у водостану зависи од протицаја Q_V :

$$Q_V = \frac{d\Pi_V}{dt} A_V \text{ односно } \frac{d\Pi_V}{dt} = \frac{1}{A_V} (Q_T - Q_{turb}) \quad (5.3)$$

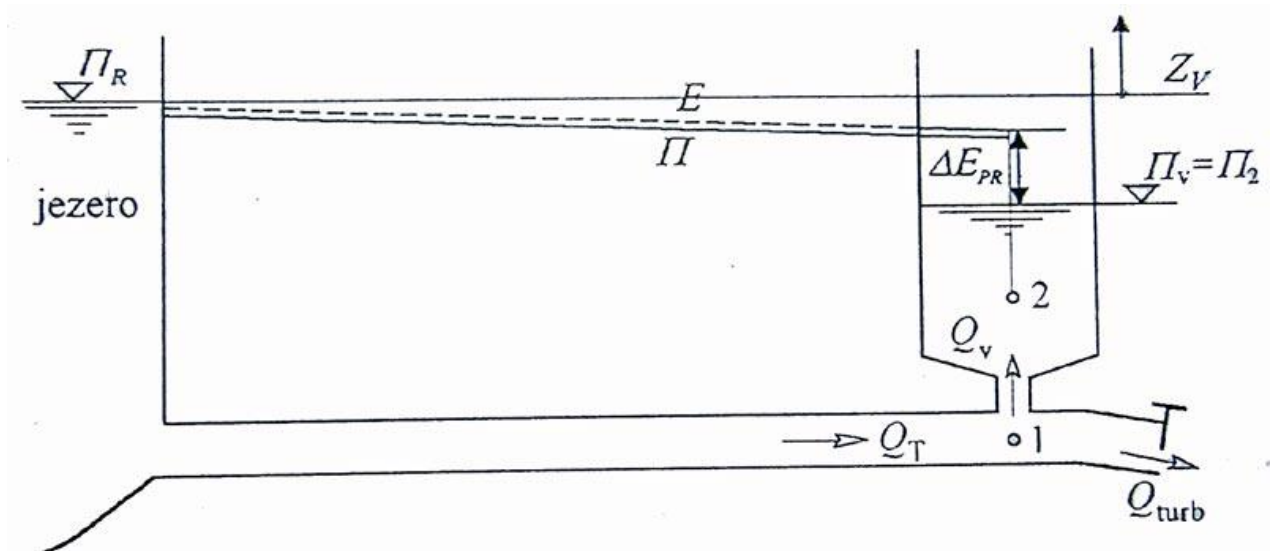
Једначине 5.2 и 5.3 дефинишу граничне услове у чвору са водостаном. Узводни гранични услов, ката нивоа у језеру, Π_R , је непроменљив (што у овом раду није случај).



Слика 5.4: Критични случајеви у раду водостана

Амплитуде осциловања, као и само пригушење и одумирање осцилација, зависе од губитка енергије течности која осцилује. Са друге стране, није препоручљиво повећавати губитке енергије дуж тунел, јер тиме производња електричне енергије постаје мање економична. Најповољније решење је укључивање губитка енергије само током осцилација.

Један од начина да се смање амплитуде осциловања, а самим тим да се смањи и грађевинска висина водостана, јесте смањење отвора на споју водостана и тунела (слика 5.5)



Слика 5.5: Водостан са пригушивачем

У овом раду прављен је модел водостана са пригушивачем тако да ћемо математички модел проширити са отпором од пригушивача.

У случају водостана са пригушивачем не важи претпоставка о једнакости пијезометарске коте на крају тунела и коте нивоа воде у водостану. Овде је $\Pi_V = \Pi_2 \neq \Pi_1$

За успостављање везе између те две пијезометарске коте користи се Бернулијева једначина:

$$\Pi_1 = \Pi_2 + \Delta E_{PR} = \Pi_2 + \xi_{PR} \frac{Q_V |Q_V|}{2gA_{PR}^2} \quad (5.6)$$

Једначина континуитета користи се у непромењеном облику (једначина 5.3), а уврштавањем релације 5.6 у динамичку једначину водостана без пригушивача, долази се до динамичке једначине за тунел са водостаном и пригушивачем:

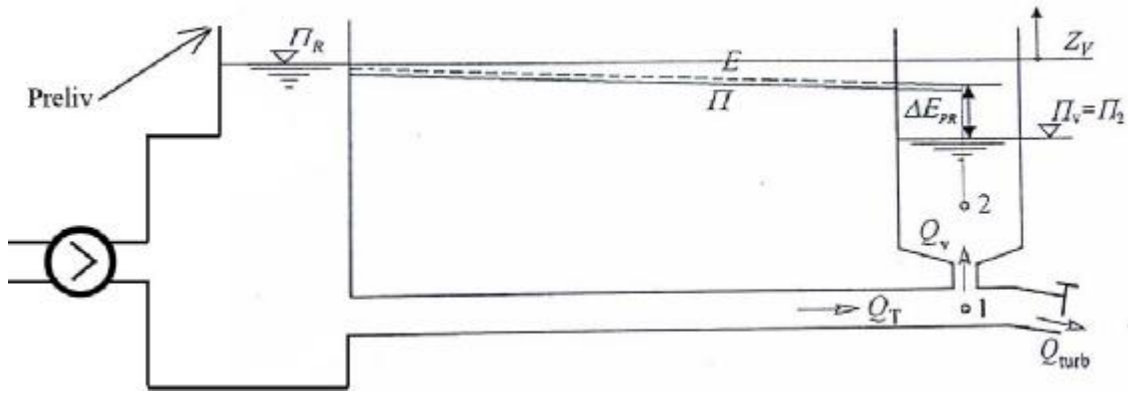
$$\frac{dQ_T}{dt} = \frac{g \cdot A_T}{L} \cdot (\Pi_R - \Pi_V - \xi_{PR} \frac{Q_V |Q_V|}{2gA_{PR}^2}) - \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D^3} \cdot Q_T \cdot |Q_T|$$

Један од проблема у ово раду јесте осцилација Π_R . У овом раду сам модел је уместо језера имао резервоар коначне запремине са преливом (слика 5.7). Због овога морамо увести и једначину континуитета за резервоар:

$$\frac{d\Pi_R}{dt} A(\Pi_R) = Q_{DOT} - Q_{TUN} \quad (5.8)$$

Треба нагласити да на моделу једначина 5.8 важи до почетка преливања и да је Q_{DOT} узето као константа пошто је при

мерењу одступање протицаја од нивоа веома мало зависило. Функција $A(\Pi_R)$ је површина резервоара и она има максимално два стања о чему ће касније бити речи где ће бити приказан нумерички модел.



Слика 5.7: Систем инсталација

Нумерички модел за водостан са пригушивачем са променом нивоа у резервоару гласи:

$$\Pi_V^{n+1} = \Pi_V^n + \frac{Q_V^n}{A_V} \Delta t$$

$$\Pi_R^{n+1} = \Pi_R^n + \frac{Q_{DOT}^n - Q_{TUN}^n}{A(\Pi_R^n)} \Delta t$$

$$Q_T^{n+1} = \Delta t \left(\frac{g \cdot A_T}{L} \cdot \left(\frac{\Pi_R^{n+1} + \Pi_R^n}{2} - \frac{\Pi_V^{n+1} + \Pi_V^n}{2} - \xi_{PR} \frac{Q_V^n |Q_V^n|}{2gA_{PR}^2} \right) - \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D_T^3} \cdot Q_T^n \cdot |Q_T^n| \right) + Q_T^n$$

6

Мерења на систему и обрада добијених података

Мерења на систему извршена су уз помоћ логера DT500 (слика 6.1). Логер је био систем за аквизицију података. Приликом конекције са рачунаром треба подесити параметре конекције:

- Baud rate – 1200
- Parity – none
- Data bits – 8
- Stop bits – 1

На самом логеру постоји десет аналогних диференцијалних улаза опсега $\pm 2.5V$, три counter улаза и четири дигитални (улаз-излаз).



Слика 6.1: Уређај за аквизицију података

Мерење на систему требало је урадити са што мањим dt , сам логер има у себи интерни сат који најситније dt приказује у секундама. Логер може да се сетује параметрима тако да мерења ради максималном брзином (команда RA за посао A), међутим тада се поставља питање колико је dt . То је овде постигнуто прављењем екстерног генератора познате фреквенције 0.5 KHz, који је имао улогу часовника резолуције 2 милисекунде. На

логеру постоји опција high speed counter (команда HSC) која ради не оптерећујући превише процесор у логеру.

Генератор фреквенција направљен је уз помоћ микропроцесора PIC16f8787А компаније microchip. Програм је писан у Basic-у и компајлиран у PIC Simulator IDE.

Шема генератора приказана је на слици 6.2 као што се примећује коришћен је кристал од 4MHz коју служи да оствари такт микропроцесора и за тај кристал је вршено компајлирање.

Програмом је сетовано да на пину 2 микропроцесора напон осцилује фреквенцијом око 1 KHz а на пину 2 фреквенцијом око 0.5 KHz

Програм:

```
TRISA = 0
```

```
рос:
```

```
PORTA = 3
```

```
WaitUs 500
```

```
PORTA = 2
```

```
WaitUs 500
```

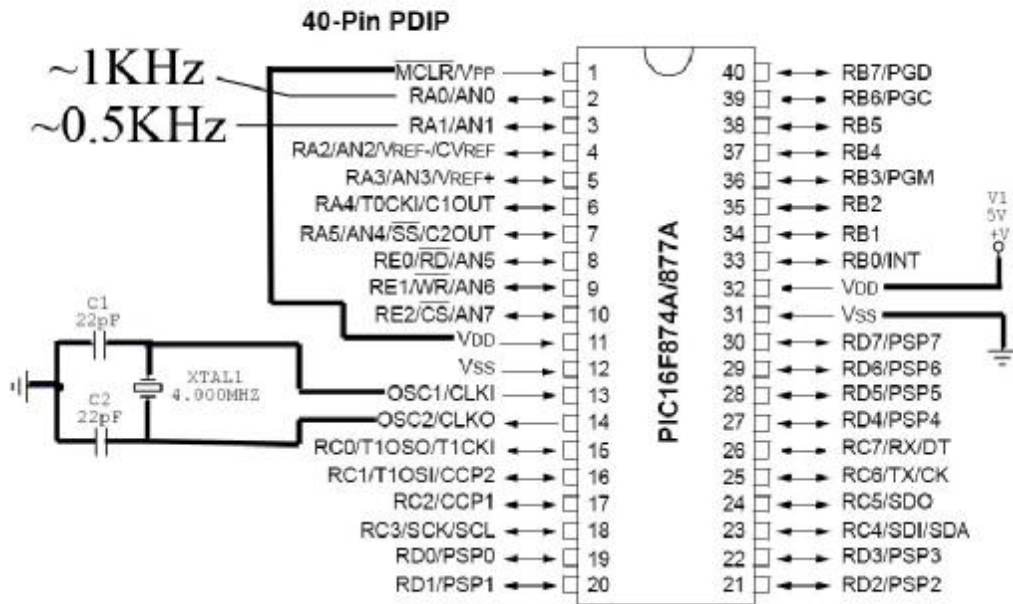
```
PORTA = 1
```

```
WaitUs 500
```

```
PORTA = 0
```

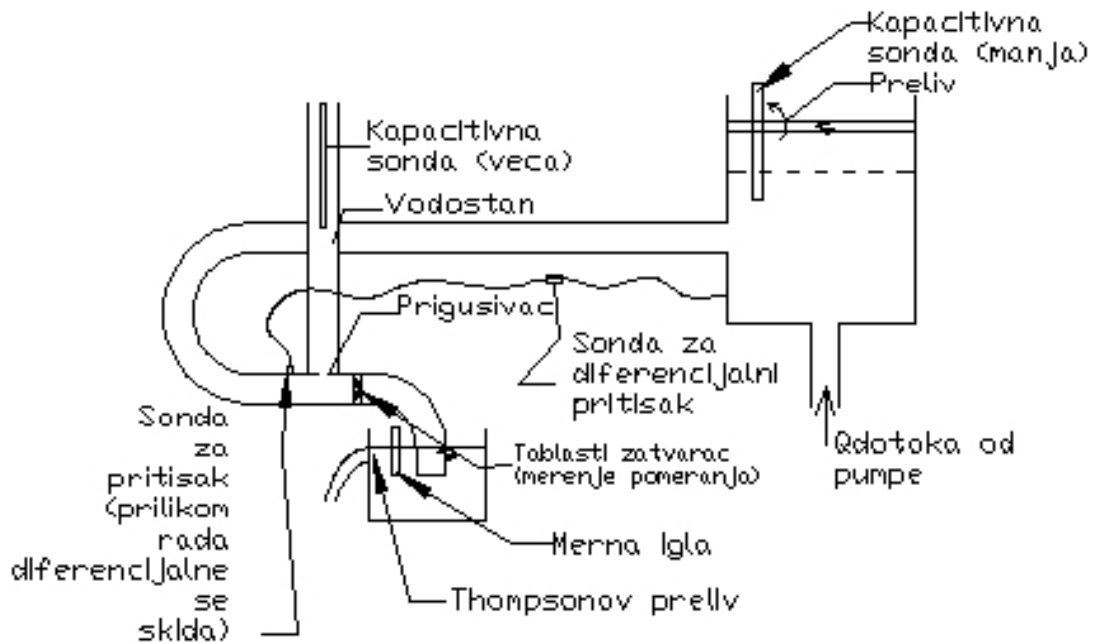
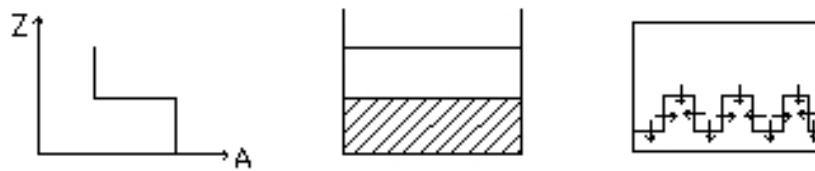
```
WaitUs 500
```

```
Goto рос
```



Слика 6.2: Шема генератора са микропроцесором

Крива површине пресек кроз прелив основа прелива



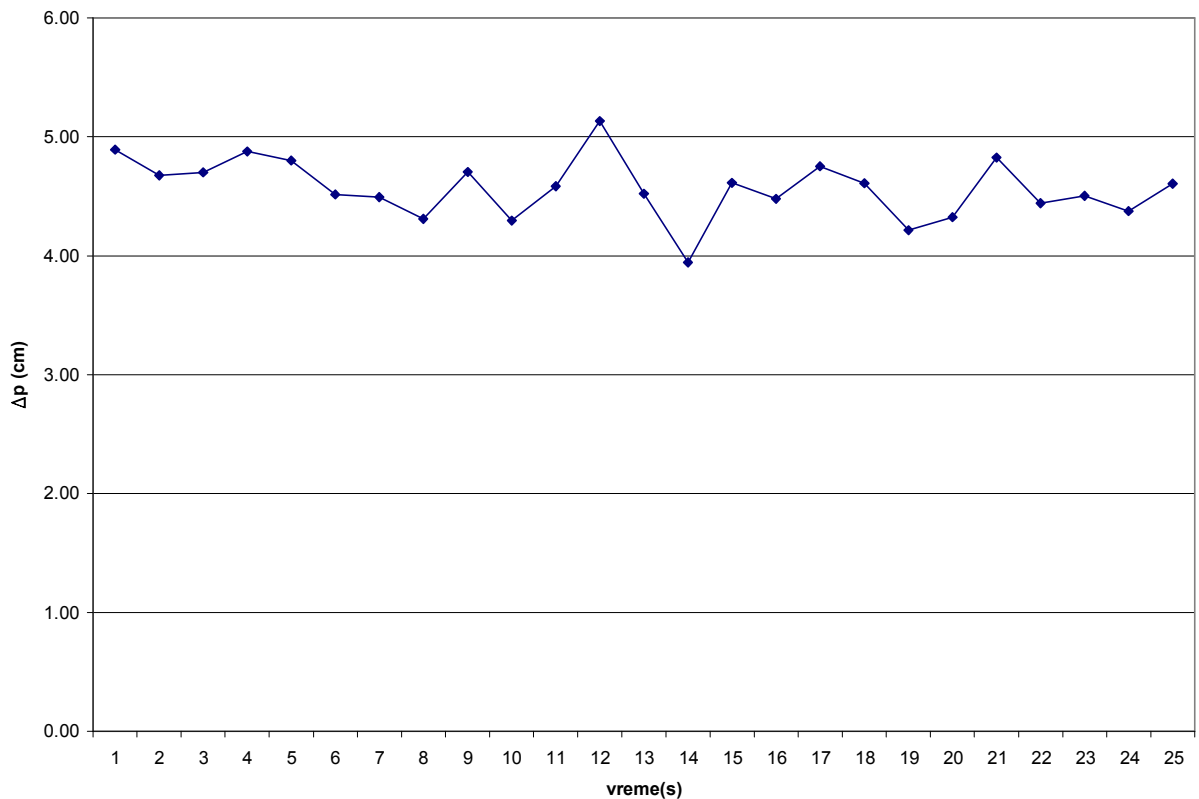
Слика 6.3: Шема мерних места

На слици 6.3 приказан је распоред мерних места. Мерно место за сонду за притисак израђено је од четири отвора по 90° који су спојени цевима ради што униформнијег притиска.

Прво мерење урађено је са диференцијалном сондом за притисак. Ово мерење урађено је да би се нашао коефицијент трења. Таблестим затварачем подешен је протицај на 10.5 l/s како је и измерено на томпсоновом преливу, помоћу мерне игле. Протицај на Томпсоновом преливу рачунат је једначином:

$$Q_T = \frac{5}{16} \sqrt{2 \cdot g \cdot h^5}$$

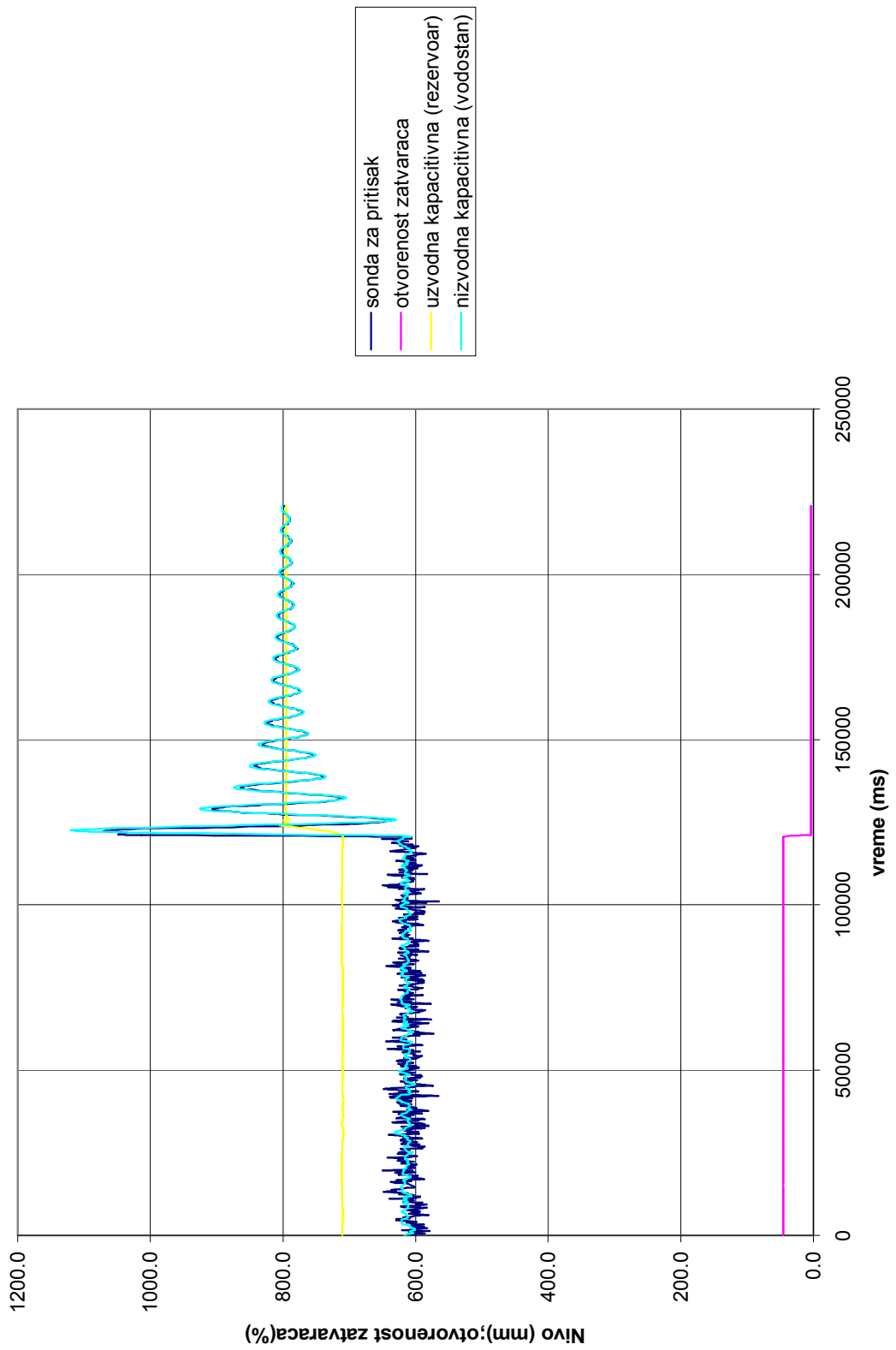
Период логовања је 1 секунда, и након претварања из напона у разлику нивоа добијен дијаграм промене разлике нивоа у времену (слика 6.4). Ако срачунамо средњу вредност, можемо рећи да је разлика нивоа била 4.6 cm .



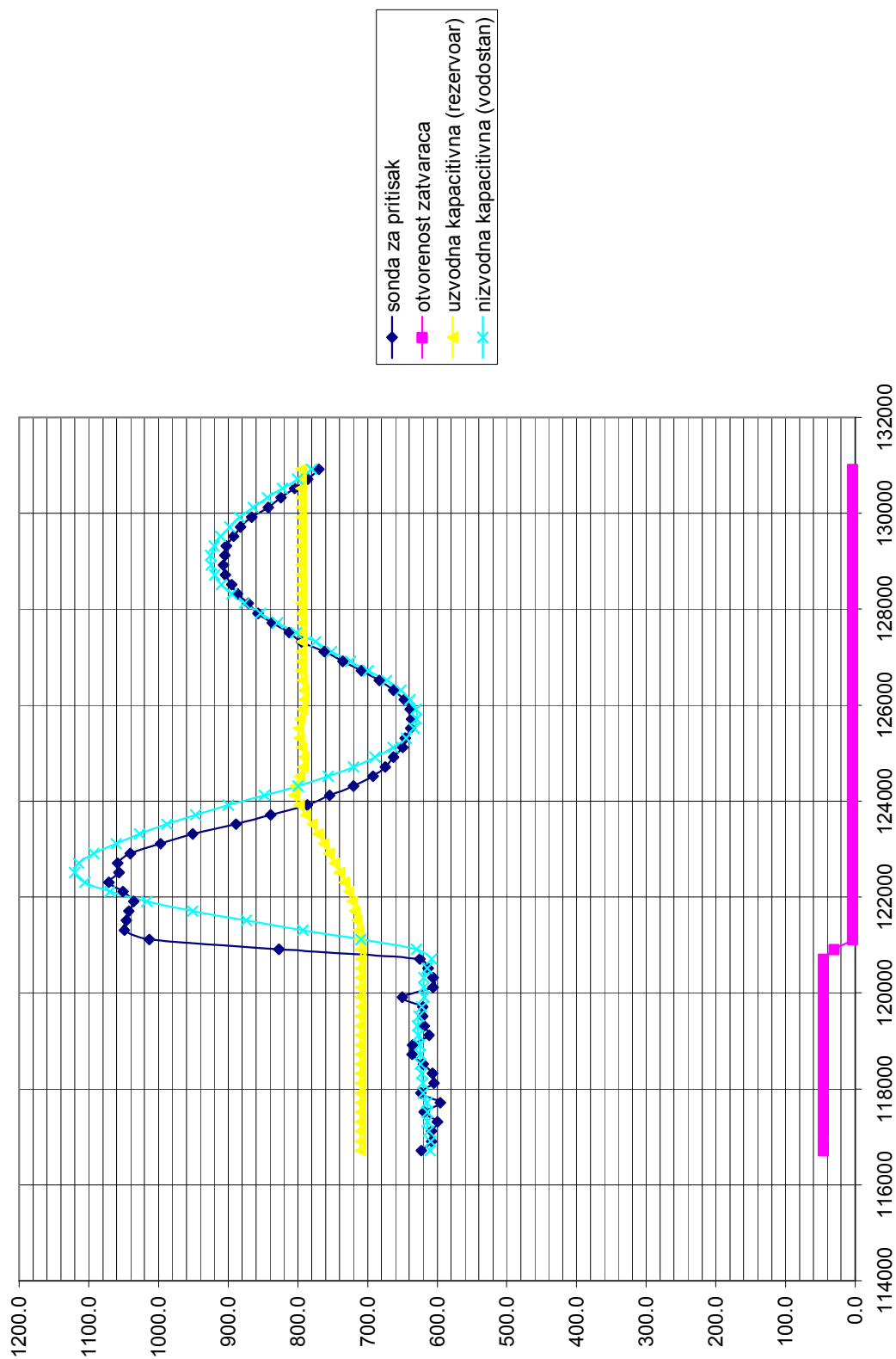
Слика 6.4: промена разлике нивоа при константном протоку

Следеће мерење је мерење осцилација течности у водостану. При овом мерењу коришћен је минимални dt који логер може да сними, око $200ms$ тј око 5 мерења у секунди.

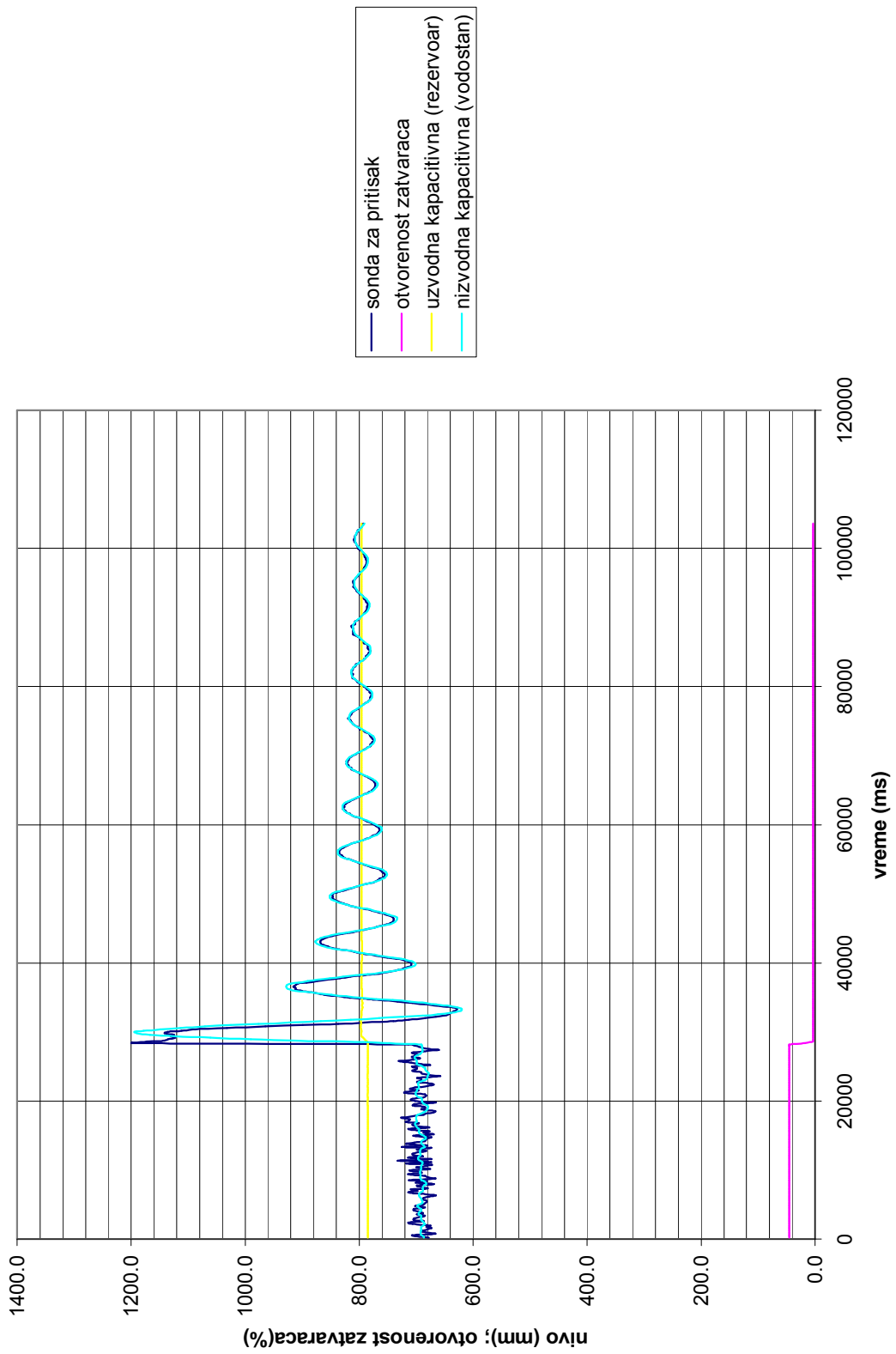
Мерење протицаја је вршено на Томпсоновом преливу уз помоћ мерне игле. Приликом првог мерења ове појаве протицај је износио $10.6 l/s$. На слици 6.5 може се видети мерење при протицају од $10.6 l/s$, а слика 6.6 је увећан детаљ најинтересантнијег дела мерења. Приликом другог мерења ове појаве протицај на Томпсоновом преливу је износио $10.4 l/s$. На слици 6.7 може се видети мерење при протицају од $10.4 l/s$, а слика 6.8 је увећан детаљ најинтересантнијег дела мерења. Приликом трећег мерења осцилација почетни протицај је износио $10.6 l/s$ и ово је специјални случај мерења, јер табласти затварач није до краја затворен па протицај на крају при полузатвореном затварачу износи $2.5 l/s$ (слика 6.9)



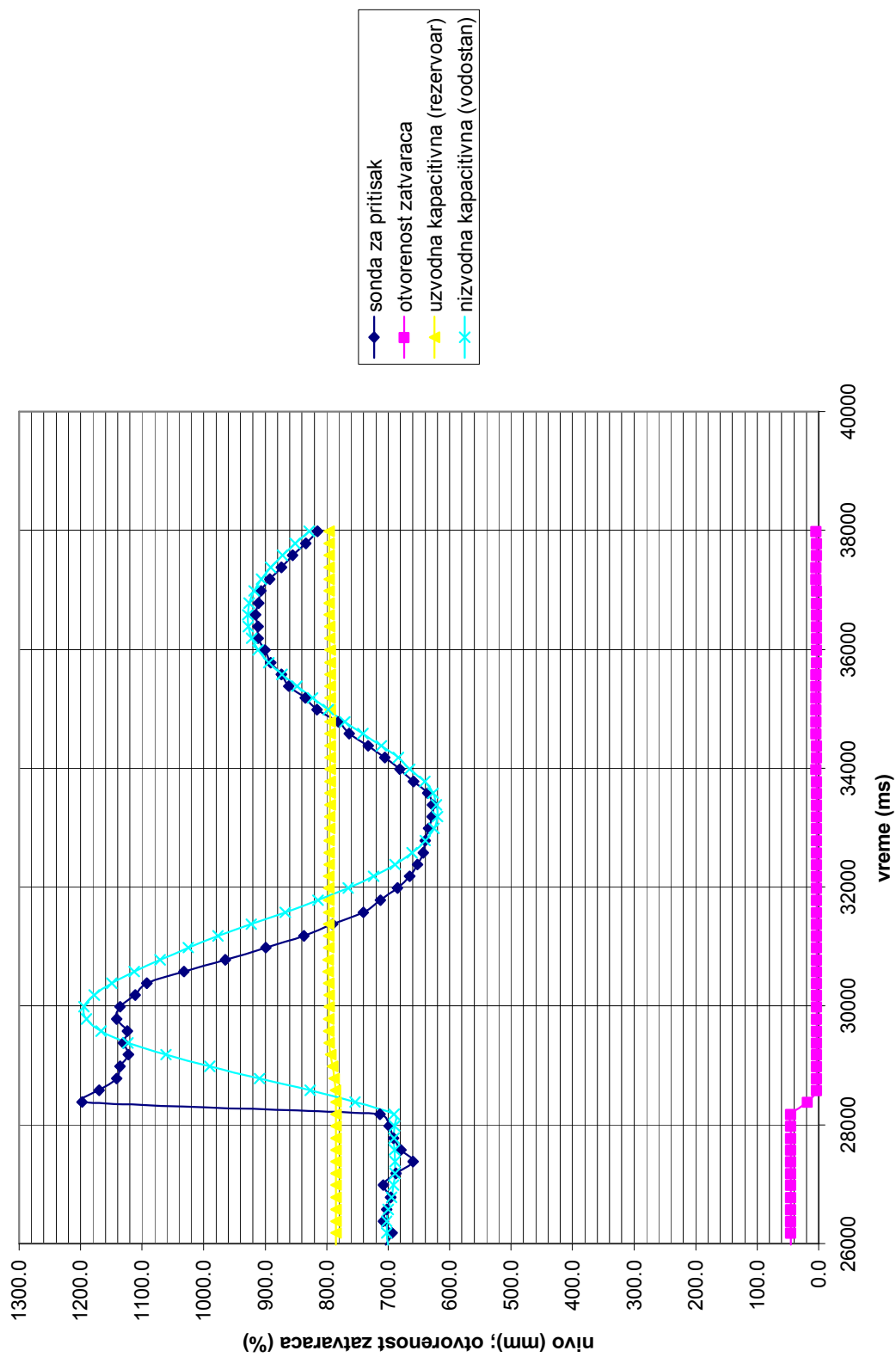
Слика 6.5: промена нивоа и отворености затварача при затварању



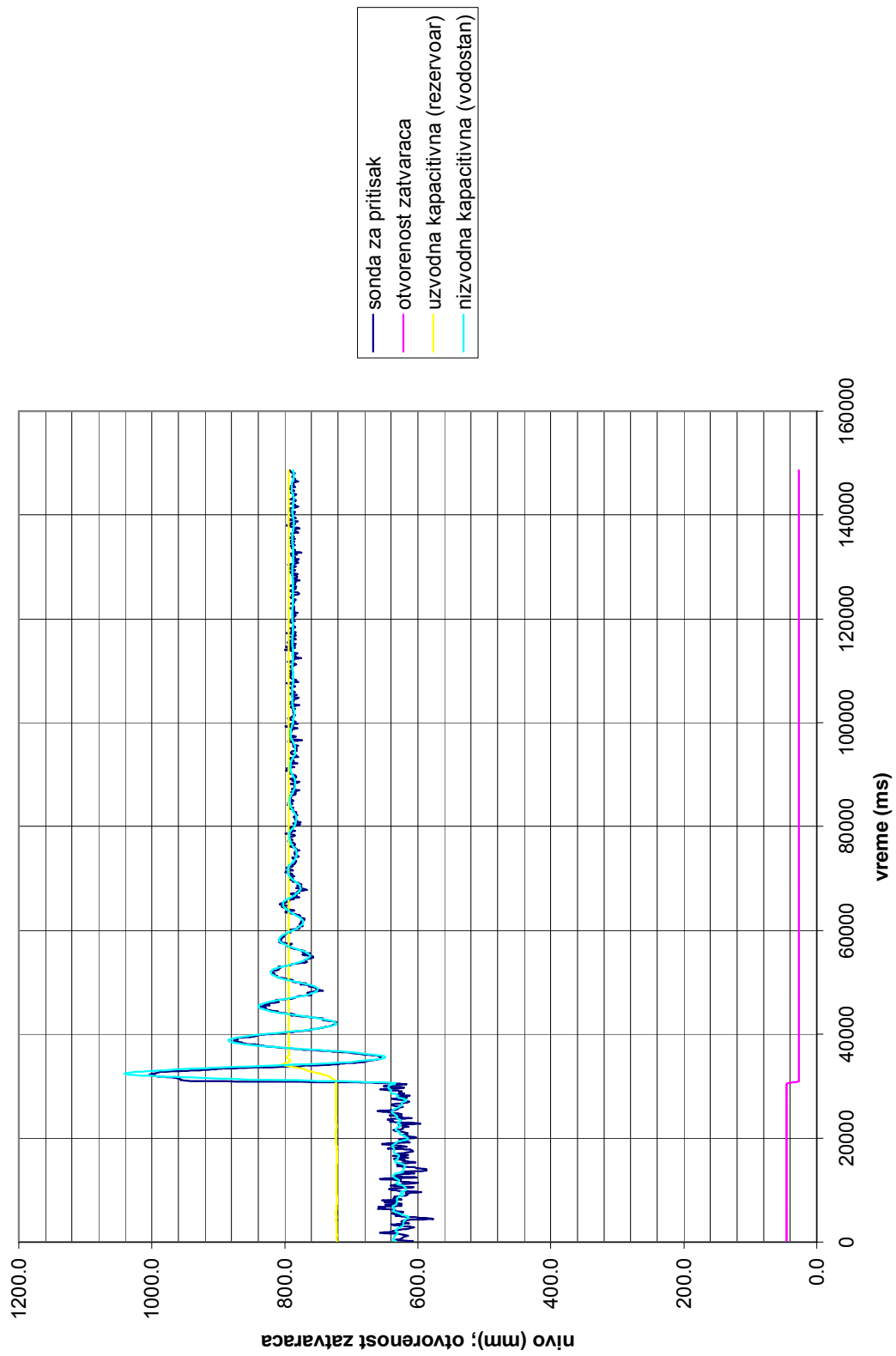
Слика 6.6: Промена нивоа и отворености, нагло затварање



Слика 6.7: промена нивоа и отворености затварача при затварању



Слика 6.8: Промена нивоа и отворености, нагло затварање



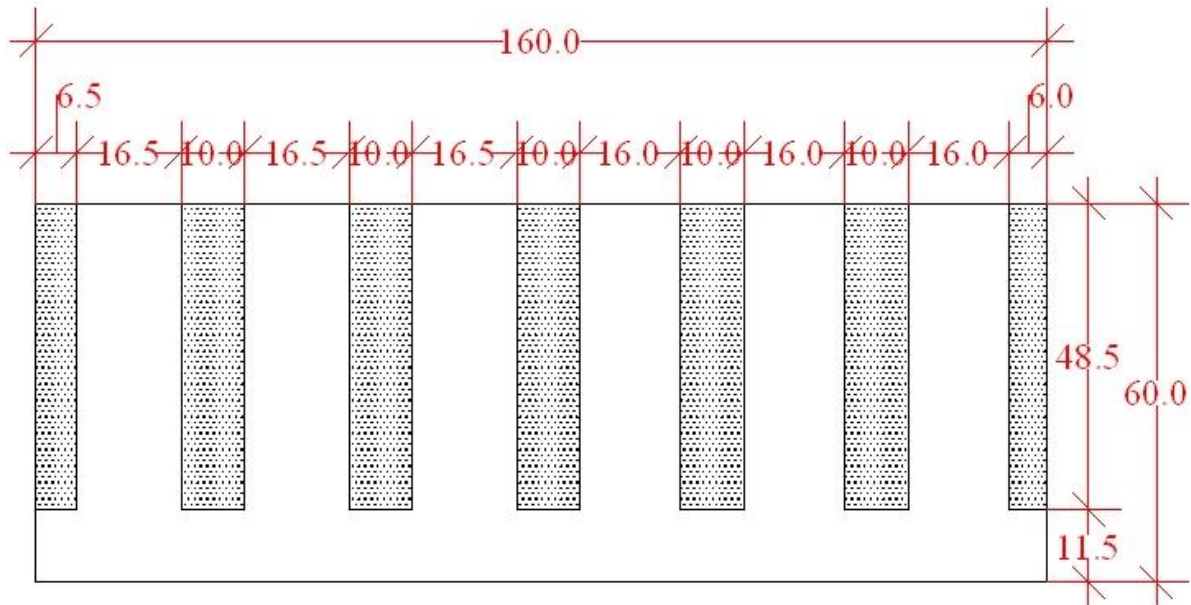
Слика 6.9: Промена нивоа и отворености, полу-затварање

7

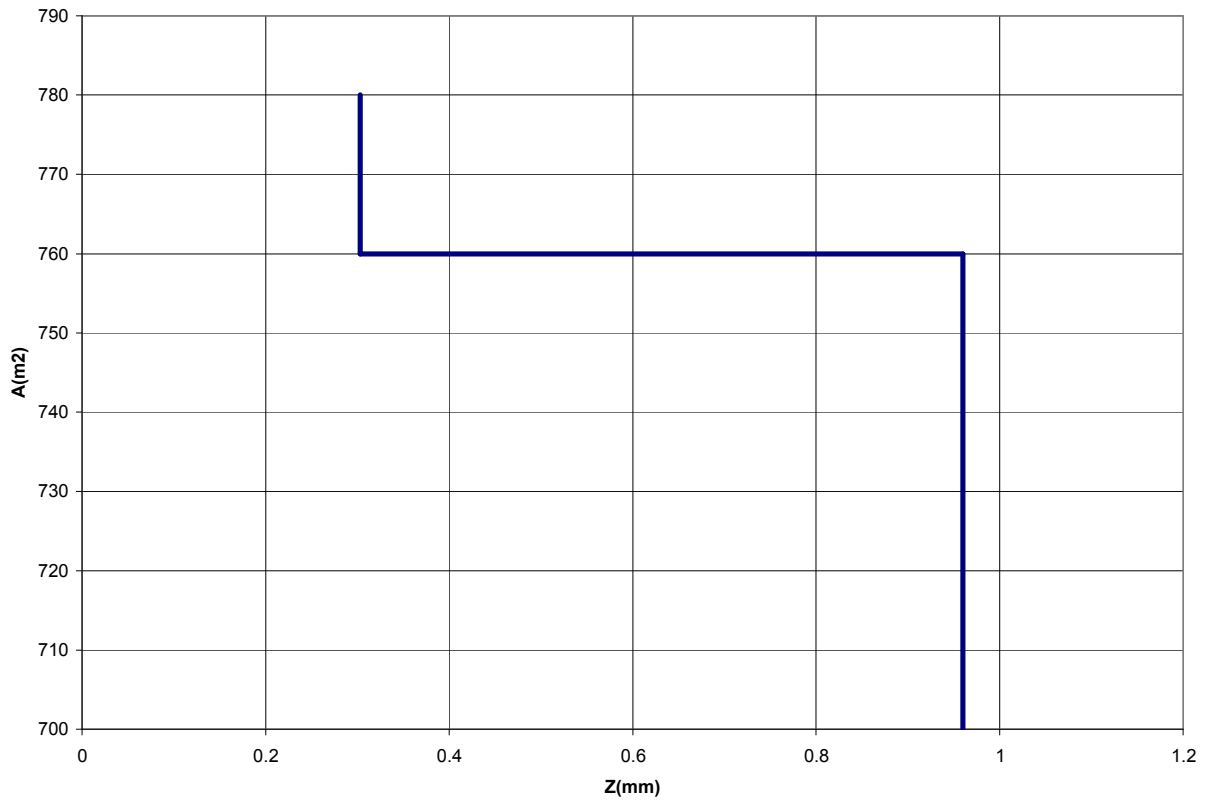
Калибрација математичког модела

Наглаио сам да ће о стањима резервоара бити речи касније а ево прилике за то. Сам резервоар има два стања површина по дубини. Ако погледамо основу резервоара (слика 7.1) и уочимо осенчена поља која преливају ка неосенченим деловима можемо увидети једну од две површина

$A_1 = 0.065 * 0.485 + 5 * 0.1 * 0.485 + 0.06 * 0.485 = 0.303125 \text{ m}^2$. Друга површина је укупна површина резервоара тј $A_2 = 1.6 * 0.6 = 0.96 \text{ m}^2$. На основу ове две површине цртамо однос висине и површине (слика 7.2)



Слика 7.1: основа резервоара



Слика 7.2: однос ниво површина у резервоару

Нумерички модел за водостан са пригушивачем са променом нивоа у резервоару гласи:

$$\Pi_V^{n+1} = \Pi_V^n + \frac{Q_V^n}{A_V} \Delta t$$

$$\Pi_R^{n+1} = \Pi_R^n + \frac{Q_{DOT}^n - Q_{TUN}^n}{A(\Pi_R^n)} \Delta t$$

$$Q_T^{n+1} = \Delta t \left(\frac{g \cdot A_T}{L} \cdot \left(\frac{\Pi_R^{n+1} + \Pi_R^n}{2} - \frac{\Pi_V^{n+1} + \Pi_V^n}{2} - \zeta_{PR} \frac{Q_V^n |Q_V^n|}{2gA_{PR}^2} \right) - \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D_T^3} \cdot Q_T^n \cdot |Q_T^n| \right) + Q_T^n$$

Програм са калибрисаним параметрима, урађен у матлабу, за мерење при протицају 10.6 l/s приказан је у наредном тексту а на слици 7.3 могу се видети резултати програма

```

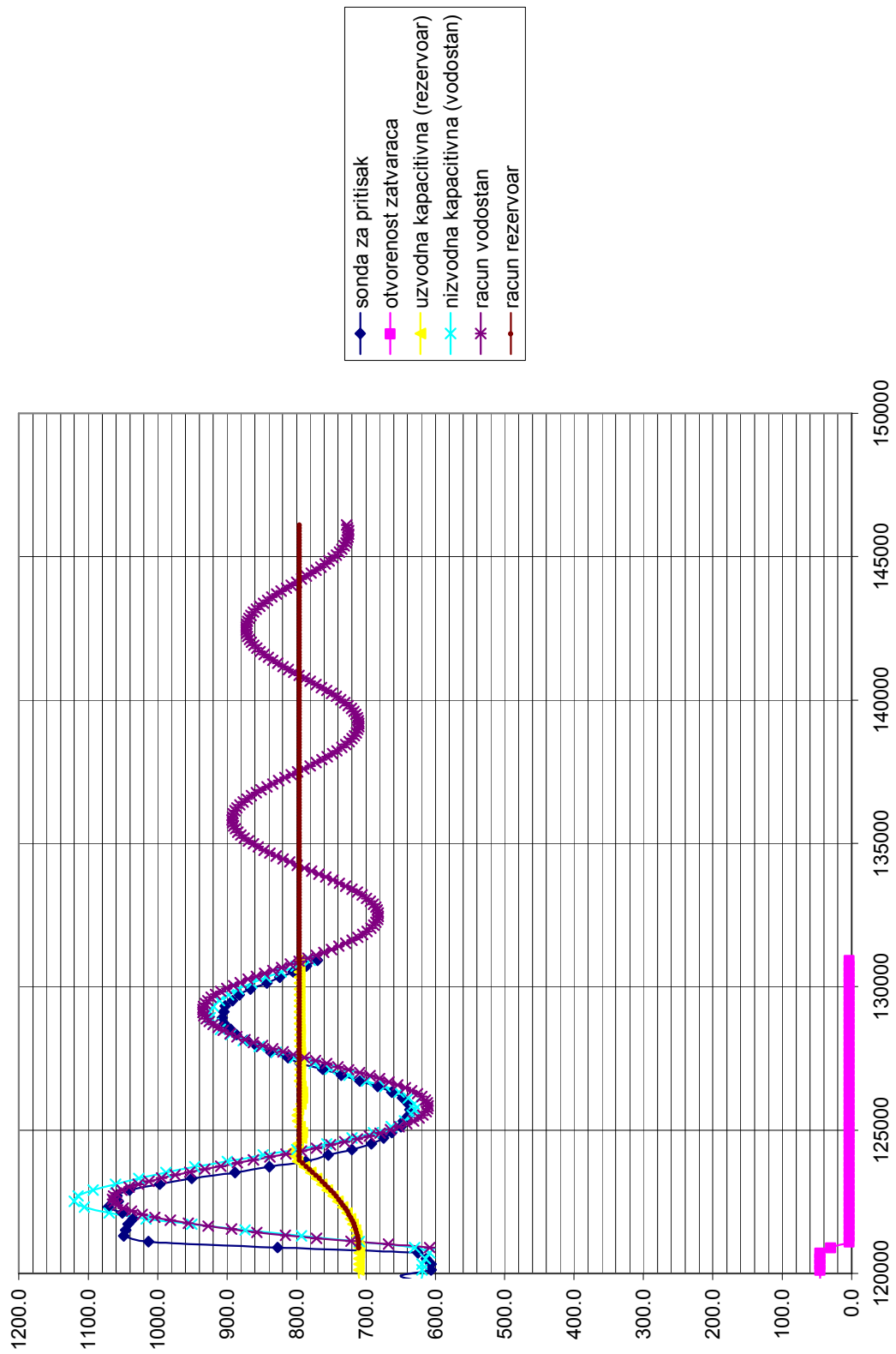
dt=0.001
Qd=0.0105
Qt(1)=0.0105
PIr(1)=0.7100
PIv(1)=0.6079
ksi=0.9
Av=0.064^2*3.14
At=0.075^2*3.14
C1=9.81*At/10
C2=1/(19.62*(0.03^2*3.14)^2)
C3=2/(3.14*0.15^3)
vreme=0;
k=0.025
for i=1:15000;
    vreme(i+1)=i/1000;
    PIv(i+1)=PIv(i)+Qt(i)/Av*dt;
    if PIr(i)<0.575;
        Ar=0.96;
    else;
        Ar=0.3031;
    end;
    if PIr(i)>0.795;
        PIr(i+1)=PIr(i);
    else;
        PIr(i+1)=PIr(i)+(Qd-Qt(i))/Ar*dt;
    end;
    re=Qt(i)/At*0.075/0.00000131;
    lambda=0.115*(k/0.15+60/re)^0.25;
    Qt(i+1)=dt*(C1*((PIr(i+1)+PIr(i))/2-(PIv(i+1)+PIv(i))/2-
    ksi*Qt(i)*abs(Qt(i))*C2)-lambda*C3*Qt(i)*abs(Qt(i)))+Qt(i);
end;
plot(vreme,PIv,vreme,PIr)

```

У овом примеру програма једначина преливања преко прелива није разматрана (тј занемарена је) него је само ограничена физичка вредност као што је и у природи максимални

ниво у резервоару при протоку 0 у тунелу док пумпа ради са својом кривом протока при константном дизању.

Сама нумеричка шема није препоручљива за овакав модел пошто долази до појачавања амплитуде ако се занемати трење и пригушивач али мањим кораком се то може маскирати а разматрање се може очекивати као приближно за првих пар осцилација.



Слика 7.3: Осцилације водостана и модела

Са слике 7.3 може се уочити да коефицијенти отпора нису исти, зависе од правца течења, тако да би модел требало проширити на два коефицијента локалног губитка (сужења)

8

Закључак и предлози за наредна истраживања

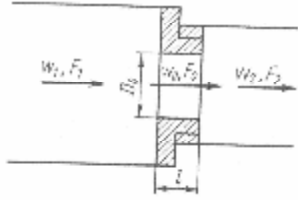
Пажљивијом калибрацијом и анализом утицаја појединих фактора на тачност капацитивне сонде, постигнуто је повећање тачности за два пута, са фабричких 1.5% спуштена је на $\pm 0.7\%$. Од додатне опреме било је неопходан само мерач температуре како би се постигла што боља тачност. Већ сам нагласио да би у наредним истраживањима требало мало боље испитати динамичке утицаје капиларности на тефлон. Требало би мерити и температуру у глави сонде тако да апелујем на произвођаче да ставе једну температурну сонду у главу капацитивне сонде да би се што боље испитао и тај утицај грешке и можда постигли још бољи резултати.

На направљеном физичком моделу водостана остављена је могућност мењања пречника пригушивача. Тиме је остављена могућности за наредна истраживања. Мерењем притиска у доводном цевоводу, примећена је појава хидрауличког удара (водостан није успео да у потпуности спречи удар) али то овде није разматрано па јби било потребно у неком следећем дипломском раду детаљније то анализирати, поготово што постоји могућност промене пречника пригушивача. Модел водостана није комплетно калибрисан из разлога што је требало одредити коефицијенте губитка при улазу и при излазу из водостана па су и ту отворене теме за наредне истраживаче.

9
Прилози

Thick-edged orifice ($l/D_h > 0.015$) installed in a transition section; $Re = w_0 D_h / \nu > 10^3$ [13, 14]

Diagram 4-12

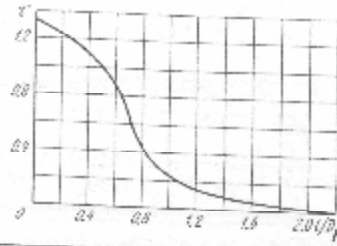


$$D_h = \frac{4F_0}{\pi_0}$$

$$\xi = \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} \approx 0.05 \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \tau \sqrt{1 - \frac{F_0}{F_2}} \times \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right) + \lambda \frac{l}{D_h} = \xi_0 + \lambda \frac{l}{D_h}$$

where $\tau = f(l/D_h)$; for λ see Chapter 2

$\frac{l}{D_h}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8
τ	1.35	1.22	1.10	0.84	0.42
$\frac{l}{D_h}$	1.0	1.2	1.6	2.0	2.4
τ	0.24	0.16	0.07	0.02	0



Orifice with beveled and rounded (in flow direction) edges installed in a transition section; $Re = w_0 D_h / \nu > 10^4$ [13, 14]

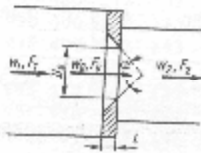
Diagram 4-13

Orifice Configuration Resistance coefficient

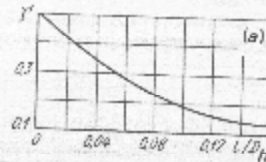
$$\xi = \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} \approx \xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + 2\sqrt{\xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right) \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)}$$

where $\xi' = f(l/D_h)$ at $\alpha = 40-60^\circ$, see graph a, at other values of α , ξ' is determined as ξ from Diagram 3-7

With beveled edges



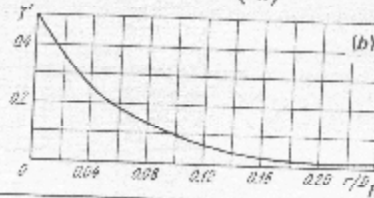
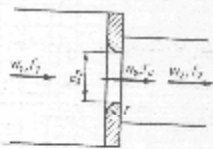
$$D_h = \frac{4F_0}{\pi_0}$$



l/D_h	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.12	≥ 0.16
ξ'	0.46	0.42	0.38	0.35	0.29	0.23	0.16	0.13

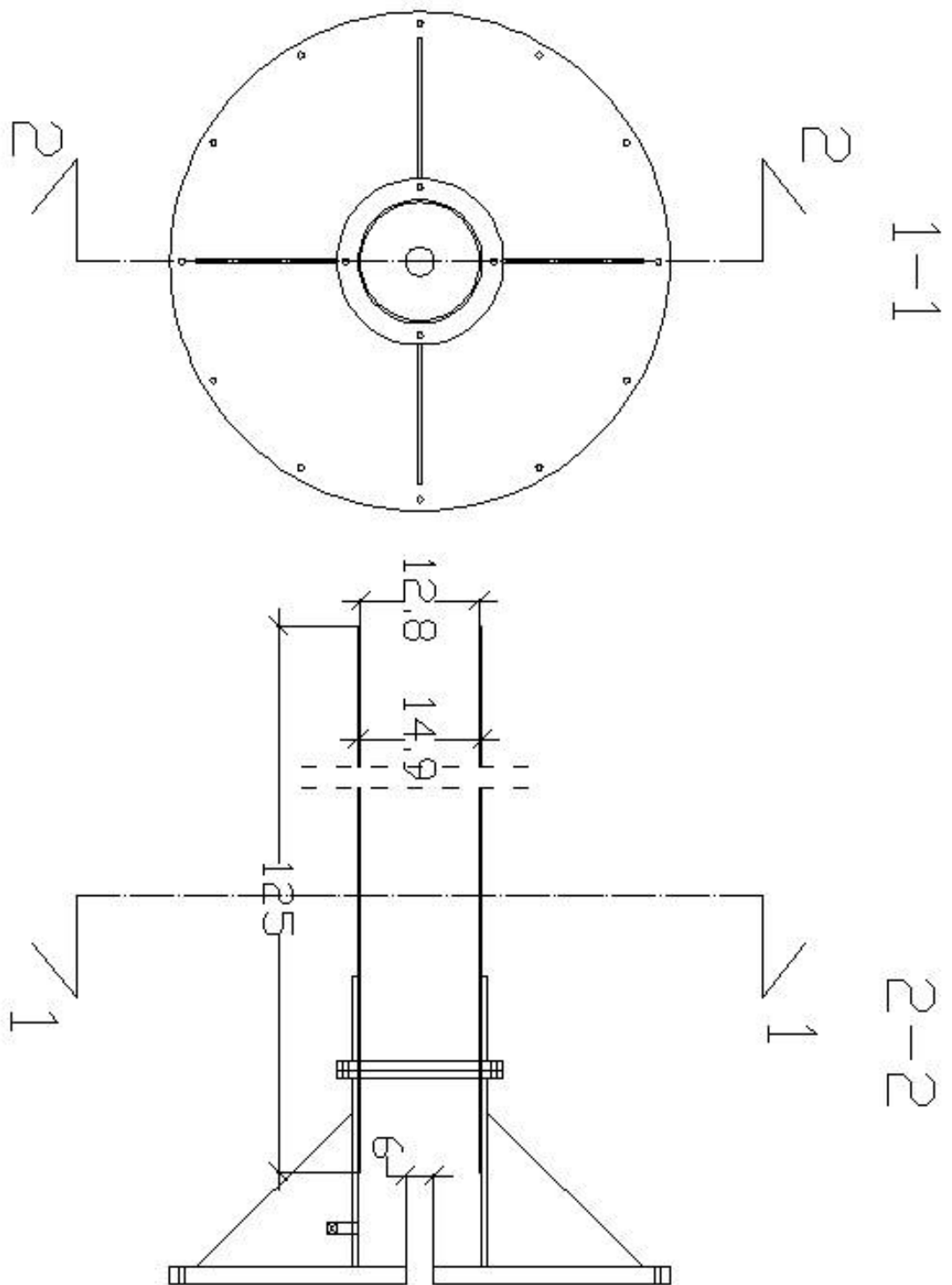
$$\xi = \xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + 2\sqrt{\xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right) \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)} \times \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right) \text{ where } \xi' = f\left(\frac{r}{D_h}\right)$$

With rounded edges



r/D_h	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.12	0.16	≥ 0.2
ξ'	0.50	0.44	0.37	0.31	0.26	0.22	0.19	0.15	0.09	0.06	0.03

Прилог 1: Отпор сужења



Прилог 2: Пресек и основа водостана

Литература

- Sinclair, R. Ian (2001) SENSORS AND TRANSDUCERS
- <http://www.geoscientific.com>
- Продановић, D (2005) Скрипта са предавања
- Иветић, М. (1996) Рачунска хидраулика течење у цевима, Грађевински факултет универзитета у Београду
- Ђорђевић, В. (1989) Кришћење водних снага књига II – објекти хидроелектрана, Грађевински факултет универзитета у Београду
- Idelchik, I. E. (godina) Handbook of hydraulic resistance
- <http://j-walk.com>
- <http://www.regal.se>