

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Грађевински факултет
Одсек за хидротехнику и водно еколошко инжењерство



МАСТЕР РАД
Из уже научне области „Механика нестишљивих
флуида и хидраулика“
Тема: Пример управљања мини хидроенергетским
системом

Кандидат:
Милош Милашиновић

Предметни наставник:
Проф.др Душан Продановић

Београд, 2015.

САДРЖАЈ

Списак слика.....	2
1 Увод.....	5
2 Преглед литературе.....	7
3 Методологија.....	8
3.1 Примена Simulink – а за моделирање каскадног хидроенергетског система.....	8
3.2 Математички модел акумулације.....	10
3.3 Нумерички модел.....	11
3.4 Концептуални дизајн модела (примена PID контроле).....	13
3.4.1 Пропорционална компонента P.....	15
3.4.2 Интегративна компонента.....	16
3.4.3 Деривативна компонента.....	17
3.4.4 Хеуристички приступ подешавању параметара PID – а.....	17
3.4.5 Увођење FEED FORWARD компоненте.....	18
4 Пример примене модела управљања каскадним ХЕС.....	19
4.1 Опис каскадног хидроенергетског система.....	19
4.2 Модел акумулације са PID контролом као моделом преградног објекта.....	28
4.3 Модел акумулације са PID контролом и моделом хидроелектране.....	30
4.4 Модел каскадног ХЕС где се рад преливних објеката моделира PID контролом.....	32
4.5 Модел каскадног ХЕС са моделом хидроелектране.....	32
4.6 Утицај мерних грешака на резултате PID контроле.....	35
5 Резултати.....	36
5.1 Резултати за модел приказан под 4.2.....	36
5.2 Резултати за модел приказан под 4.3.....	57
5.3 Резултати за модел приказан под 4.5.....	75
5.4 Резултати симулације са утицајем мерних грешака на рад PID контроле.....	78
6 Дискусија.....	79
7 Закључци.....	81
Литература.....	82

Списак слика

- Слика 1 Изглед основних елемената коришћених за моделирање хидроенергетског система: а) Акумулација, б) Хидроелектрана и в) Хидрограм
- Слика 2 Пример уношења хидрограма у оквиру подокружења Simulink
- Слика 3 Нумеричка схема за модел дифузионог таласа
- Слика 4 Апроксимиран попречни пресек речног корита
- Слика 5 Схематски приказ система са повратном спрегом
- Слика 6 Механички систем који осцилује
- Слика 7 Изглед излаза из система у зависности од карактеристика система [10]
- Слика 8 Утицај различитих вредности K_r на реакцију система
- Слика 9 Утицај различитих вредности коефицијента K_I (вредност K_r је константна)
- Слика 10 Утицај деривативне компоненте (K_r и K_I су константни)
- Слика 11 Схема акумулације представљене као резервоар
- Слика 12 Схематски приказ побољшане PI контроле ($PI + FEED FORWARD$) [8]
- Слика 13 Локација коришћене деонице Велике Мораве за формирање једне фиктивне акумулације
- Слика 14 Топографска подлога разматране деонице
- Слика 15 3D изглед природне деонице Велике Мораве извучен из програмског пакета Нес-Ras
- Слика 16 Линије нивоа за природно и апроксимирано корито
- Слика 17 А) Схема рада хидроелектране; Б) Пример прелива контролисаног сегментном уставом са покретном клапном
- Слика 18 Промена коефицијента преливања са променом угла клапне изражено у империјалним јединицама
- Слика 19 Схема покретне, преливне клапне
- Слика 20 Модел једне акумулације са PID контролом као моделом преградног објекта
- Слика 21 Алгоритам управљања покретним, преливним клапнама
- Слика 22 Модел акумулације и хидроелектране
- Слика 23 Схематски приказ каскадно ХЕС састављеног од 10 ХЕ
- Слика 24 Модел каскадног ХЕС са PID контролом као моделом хидроелектрана (напомена: ради прегледности приказане су само две од укупно десет ХЕ, осталих 8 изгледа идентично као и друга)
- Слика 25 Модел каскадног ХЕС са моделом хидроелектрана (напомена: ради прегледности приказане су само две од укупно десет ХЕ, осталих 8 изгледа идентично као и друга)
- Слика 26 Улазни хидрограм у најузводнију акумулацију
- Слика 27 Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметра 1
- Слика 28 Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметра 1

Слика 66	Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 10
Слика 67	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 1
Слика 68	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 1
Слика 69	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 1
Слика 70	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 2
Слика 71	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 2
Слика 72	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 2
Слика 73	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 3
Слика 74	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 3
Слика 75	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 3
Слика 76	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 4
Слика 77	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 4
Слика 78	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 4
Слика 79	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 5
Слика 80	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 5
Слика 81	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 5
Слика 82	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 6
Слика 83	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 6
Слика 84	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 6
Слика 85	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 7
Слика 86	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 7
Слика 87	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 7
Слика 88	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 8
Слика 89	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 8
Слика 90	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 8
Слика 91	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 9
Слика 92	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 9
Слика 93	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 9
Слика 94	Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 10
Слика 95	Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 10
Слика 96	Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 10
Слика 97	Вредност грешке на свакој од ХЕ
Слика 98	Ниво уз прелив на свакој од ХЕ
Слика 99	Излазни протоци на свакој од ХЕ
Слика 100	Грешка за сваку од ХЕ у систему
Слика 101	Ниво уз прелив за сваку од ХЕ у систему
Слика 102	Излазни протоци за сваку од ХЕ у систему
Слика 103	Кота круне прелива за сваку од ХЕ у систему
Слика 104	Положај преливне клапне за сваку од ХЕ у систему
Слика 105	Вештачки генерисан шум
Слика 106	Ниво уз прелив и излазни проток услед мерних грешака

1 Увод

Тенденција XXI века је постепена замена фосилних горива обновљивим изворима енергије, при чему се, као једно од најједноставнијих и најприступачнијих решења, намеће значајније коришћење хидропотенцијала. На основу података Република Србија располаже са 27200 GWh/god хидропотенцијала [4] од чега се годишње користи око 9000 GWh [9], односно, искоришћеност је свега 33%. Последњих година све се чешће прича о бољем искоришћењу хидроенергетског потенцијала, како би се допринело стабилности енергетског система Републике Србије, о чему сведоче и бројни страни инвеститори који налазе интереса у инвестирању у изградњу хидроелектрана на овим рекама. Као једно од решења за искоришћење хидроенергетског потенцијала предвиђају се на одређеним рекама каскадни мини хидроенергетски системи, који се састоје од две или више редно повезаних проточних хидроелектрана. Каскадни хидроенергетски системи се у много чему разликују у односу на остала решења за искоришћење хидроенергетског потенцијала (дериивационе и акумулационе хидроелектране). У оквиру каскадног хидроенергетског система све хидроелектране утичу међусобно једна на другу, чинећи на тај начин сложен систем са становишта управљања ис тим. Међусобни утицај хидроелектрана у оваквом систему највише се огледа у хидрауличком смислу, јер он највише утиче на саму производњу енергије, која представља крајњи „производ“ овог сложеног система. Стога се као главни задатак намеће правилно управљање каскадним хидроенергетским системима.

Тема овог рада је анализа управљања потенцијалним хидроенергетским системом на равничарској реци са малим расположивим падовима и акумулацијама малих запремина. Као основа за рад употребљен је нумерички модел каскадних хидроенергетских система применом математичког модела дифузионог таласа [1] који је у оквиру овог рада унапређен бољом апроксимацијом геометрије корита и додатним управљачким елементима. За геометрију корита, искоришћени су подаци о деоници Велике Мораве код Туприје, дужине 2066 м. Са том геометријом, формиран је систем са десет каскадно постављених хидроелектрана. Моделирање и анализа управљања оваквим ХЕС урађена је у оквиру програмског језика MATLAB, тачније у оквиру његовог подокружења Simulink. Направљени модел би могао да се примени и на реалним примерима, када би могао да се користи и у сврхе анализе енергетске производње електрана.

Анализа управљања каскадним хидроенергетским системом у оквиру овог рада заснива се на моделирању речних деоница (акумулација малих запремина) између суседних преградних објеката, као и на моделирању самих преградних објеката, тачније преливних објеката у циљу ефикасног управљања. За моделирање акумулација коришћен је математички модел дифузионог таласа са дискретизацијом једначина на смакнutoј нумеричкој схеми. Постојећа, природна, геометрија речне деонице апроксимирана је мањим бројем сложених апроксимираних попречних пресека са линеарном интерполацијом на рачунске пресеке. Управљање радом преливних објеката моделирано је применом пропорционално – интегративно - деривативне (PID) контроле на основу успостављене бездимензионалне везе између протока и нивоа.

Са научно – истраживачког и инжењерског аспекта од изузетног значаја је испитати како одређене управљачке одлуке утичу на хидрауличке параметре деонице. Испитано је како поједине вредности контролних параметара утичу на резултате и одређени закључци су изведени. Циљ анализе рада каскадног хидроенергетског система је, као што је претходно поменуто, испитати утицај различитих вредности контролних параметара на хидрауличке параметре акумулација а на основу тих резултата установити које су то вредности које задовољавају неке унапред дефинисане критеријуме за управљање. Поред тога, испитиване су различите вредности параметара који се односе на маневарске способности преливних објеката (брзина отварања/затварања) у циљу одређивања вредности која у одређеној мери, може да прати команде PID контроле а да при томе не угрожава физичка ограничења рада преливних објеката, као и да не угрожава рад преосталог дела хидроенергетског система стварањем поплавних таласа. У ту сврху испитана је динамика система при различитим диспозицијама, тј. у случајевима када се не разматрају маневарске способности преливних објеката и други случај у ком је модел ограничен коначном вредношћу брзине маневрисања.

Поред испитивања утицаја различитих вредности контролних параметара уз различита ограничења, испитан је и утицај мерних грешака на понашање система, тј. стабилност система.

2 Преглед литературе

Као основа за рад искоришћена је идеја настала у оквиру семинарског рада на предмету Управљање хидротехничким објектима (Иветић Д., (2015), *Управљање преливним објектима каскадног ХЕС Западна Морава*) у коме је развијена идеја моделирања каскадних хидроенергетских система у оквиру подокружења Simulink имплементирањем математичког и нумеричког модела дифузионог таласа као методе а моделирање неустаљеног течења у акумулацијама малих запремина. На основу података из литературе (Ђорђевић Б., (2001), *Хидроенергетско коришћење вода*, Грађевински факултет) и извештаја надлежног предузећа за производњу и дистрибуцију електричне енергије (Електропривреда Србије, (2011), *Извештај за 2011. годину*) извучен је закључак о неискоришћености хидроенергетског потенцијала на територији Републике Србије, чиме је потврђена претпоставка о неопходности коришћења каскадних хидроенергетских система. На основу проблема који је дефинисан и који је треба испитати, а своди се на одржавање нивоа у одређеним границама испред проточних хидроелектране које се користе у случајевима када не постоји могућност стварања значајније запремине, проблем је третиран као систем који се побуђује на осциловање при чему на основу предавања из предмета Мерења у хидротехници (Продановић Д., (2010), *Скрипта са предавања (радни материјал) – мерења у хидротехници*) коришћена је диференцијална једначина којом се описују осцилације ситема. Како би се претходно поменута једначина превела на облик погодан за стабилизацију осцилација хидроенергетског система коришћен је принцип смањења осцилација увођењем негативне повратне спреге (Astrom K. J., (2002), *Control System Design*) у виду PID контроле (Gullhamn E., (2004), *Control of water content and retention in hydropower plant cascades*; Foo M., Ooi S. K., Weyer E., (2013), *Centralised and decentralised control of the Broken river*, Hartmut L., Eckhard A., (2002), *Model based predictive control of river reservoir*). При моделирању хидроелектране, тачније при моделирању рада преливних објеката у виду преливних ротирајућих клапни, морало је у модел увести случај промене коефицијента протока при различитим положајима преливног објекта услед промене закривљености струјница, за шта су коришћена истраживања инжењерских организација са територије САД (Rantz S. E. And others, (1982), *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of discharge*).

Као тест модел, услед недостатка бољих података, искоришћене су расположиве подлоге при чему је формиран фиктивни (тест) каскадни хидроенергетски систем по узору на постојећи генерални пројекат (Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Завод за бране, хидроенергетику, руднике и саобраћајнице, (2010), *Хидроелектране на Ибру – генерални пројекат*) из чега је проистекао каскадни систем од 10 хидроелетрана који је приказан у наставку рада.

При подешавању параметара који утичу на управљање преливних објеката коришћене су препоруке америчких истраживача (Ziegler J. G., Nichols N.B. (1941), *Optimum Settings for Automatic Controllers*)

3 Методологија

Анализа могућности управљања каскадним ХЕС је спроведена на фиктивном систему, на равничарској реци са малим падом и са малим ретензионим простором. За израду модела каскадног хидроенергетског система коришћен је програмски језик MATLAB, тачније његово подокружење Simulink, имајући у виду широк спектар могућности које ово подокружење пружа. Хидроенергетски ситем представљен је раличитим елементима, од којих неки имају већи значај и биће детаљније објашњени док други служе као помоћни при различитим математичким и логичким операцијама и неће се дубоко залазити у њихово објашњавање.

Основни елементи модела су акумулације, тј. речне деонице између суседних преградних објеката, хидроелектране које поред турбина подразумевају и преливне објекте чији рад је потребно анализирати, PID контроле које представљају везу између два претходно поменутог елемента модела и хидрограми, елементи који се користе као генератори сигнала на узводном крају ХЕС и на мес тима на којима у оквиру акумулација постоје притоке. Сви претходно поменути елементи описани су у наставку, у оквиру поглавља 3.1.

Елементи модела (хидрограми, акумулације и хидроелектране) су постављени тако да излаз из једног елемента представља улаз у други елемент (нпр улаз у елемент који се односи на хидроелектрану је излаз из елемента који се односи на акумулацију). На мес тима на којима се налазе значајније притоке потребно је акумулацију раздвојити на два елемента, део узводно и део низводно од места ушћа притоке, чиме се долази до тога да су неке акумулације моделиране са два елемента акумулације у оквиру Simulink – а.

За моделирање акумулација (речних деоница) коришћен је математички модел неустаљеног течења описан моделом дифузионог таласа и дискретизованим на смакнутој нумеричкој схеми, док се математички апарат пропорционално – интегративно - деривационе контроле користи за моделирање преградног објекта. Коришћени су вештачки јединични хидрограми као улаз у систем како би се анализирао рад преливних објеката и утицај рада каскадног система на основне хидрауличке параметре акумулације.

Као што је већ речено, за анализу модела управљања каскадним хидроенергетским системом коришћен је фиктивни систем, за чије формирање је послужила деоница реке Велике Мораве, тј. подаци о геометрији ове деонице који су раније коришћени у оквиру софтвера НЕС – RAS за хидрауличке прорачуне за потребе израде елабората из предмета Регулација река.

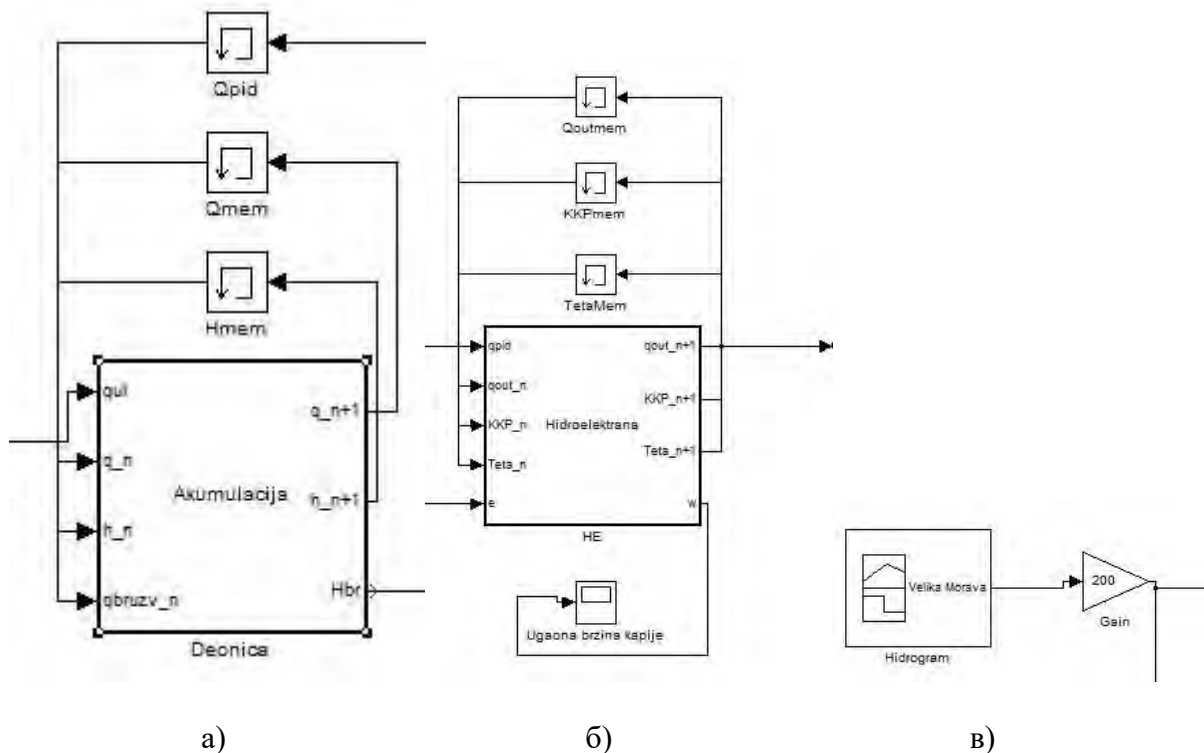
3.1 Примена Simulink – а за моделирање каскадног хидроенергетског система

Концептуални модел каскадног хидроенергетског система формиран је у оквиру подокружења Simulink. Simulink се користи за анализу рада различитих система и уређаја, као што су сложени енергетски системи, системи за обраду сигнала, различити индустријски системи итд. Одлика овог окружења је да поседује библиотеку готових елемената за различите математичке и логичке операције, исписивање резултата, задавање улазних сигнала, меморисање података, контролне функције итд. Поред готових елемената Simulink пружа могућност и креирања сопствених елемената који су коришћени за моделирање ХЕС-а.

Треба имати у виду да се исписивање програмских кодова у оквиру одговарајућих елемената коришћених у Simulink – у разликује у односу на исписивање програмских кодова у самом MATLAB окружењу. Simulink више одговара објектно – оријентисаном начину писања што и није чудно имајући у виду природу овог подокружења.

За моделирање акумулација и преградних објеката, тачније за имплементацију кодова којима се моделирају ова два елемента система, коришћене су тзв. уграђене функције (енг. Embedded function) које омогућавају имплементацију програмског кода написаног од стране корисника. Одлика ових функција је та да извршавају наредбе предвиђене кодом у једном временском кораку, због чега је у оквиру овог модела било потребно користити меморијске блокове за чување вредности променљивих из претходног временског корака. Оно што је веома битно за ове функције је то да је неопходно правилно дефинисати величине које представљају улаз и величине које представљају излаз, тј. величине које своје вредности добијају као резултат извршавања наредби предвиђених имплементираним програмским кодом.

Још један од основних елемената коришћених у оквиру овог модела, којим је представљена узводна деоница система или неке од притока је елемент којим се у систем уносе хидрограми. Елемент који је коришћен у ту сврху спада у готов елемент из групе такозваних „извора“ (енг. source) којим се генеришу улазни сигнали, у овом случају улазни вештачки или осмотрени хидрограми (енг. Signal Builder).



Слика 1. Изглед основних елемената коришћених за моделирање хидроенергетског система:

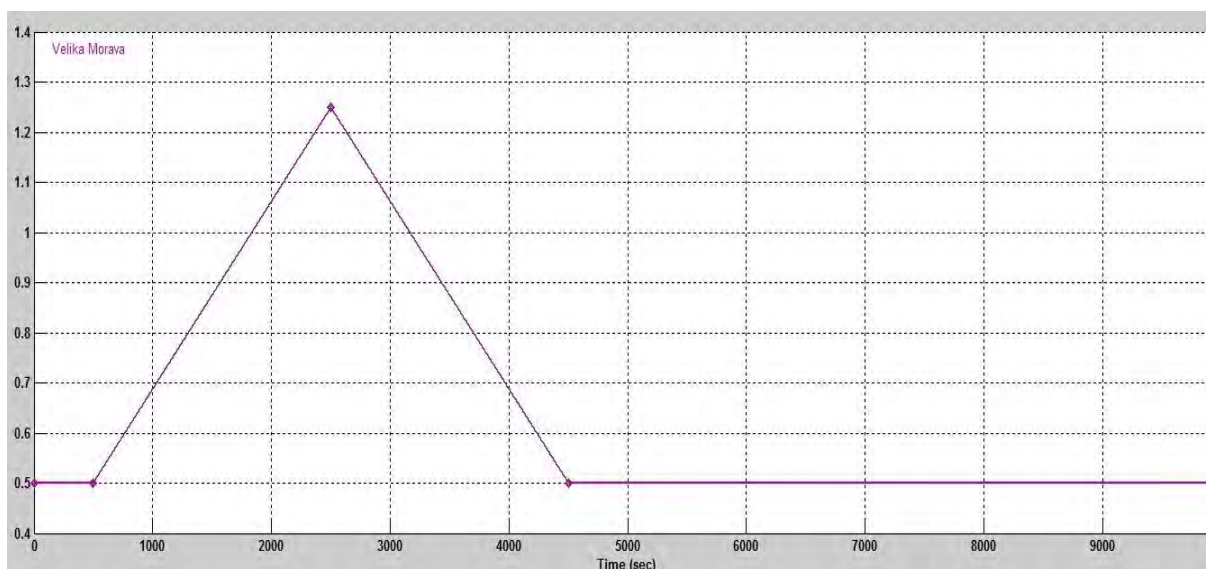
а) Акумулација (речна деоница), б) Хидроелектрана и в) Хидрограм

Првим елементом, који се односи на акумулацију, моделира се речна деоница између две суседне хидроелектране. У њега је имплементиран програмски код који у ствари представља нумерички модел акумулације који ће касније бити објашњен. Као што је већ речено, природа оваквих елемената захтева правилно дефинисање улазних и

излазних величина. Величине, које се могу видети на слици 1.а), q_n , q_{ul} , h_n , q_{bruzv_n} представљају улаз вредности хидрауличких параметара из претходног временског тренутка. Величине q_{n+1} , h_{n+1} , H_{br} представљају вредности хидрауличких параметара деонице у наредном временском кораку. На исти начин функционише и елемент Хидроелектрана, само што начин добијања излазних величина одговара имплементираним алгоритму за управљање преливним објектима, за разлику од претходног елемента.

Пошто природа употребљених елемената у оквиру Simulink – а, омогућава извршавање програмског кода у једном временском кораку, за потребе нумеричког модела акумулације и алгоритма за управљање преливним објектима (који ће бити објашњени у неком од наредних поглавља) користе се елементи Q_{mem} , H_{mem} , Q_{pid} , Q_{outmem} , T_{etatem} , KKP_{mem} који представљају меморијске блокове који омогућавају чување вредности раличитих променљивих из претходног временског корака.

Трећи од коришћених елемената за моделирање хидроенергетског система је елемент којим се генеришу вештачки или осмотрени хидрограми (слика 1.в), који има могућност директног уношења вредности или учитавања из неког фајла.



Слика 2. Пример уношења хидрограма у оквиру подокружења Simulink

3.2 Математички модел акумулације

При моделирању акумулација, или речних деоница између суседних хидроелектрана, полази се од основних Сен – Венанових једначина у којима као непознате фигуришу дубина h и проток Q :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - I_0 \right) + \frac{1}{2} C_r \frac{Q^2}{AR} = 0 \tag{2}$$

Где је B – ширина воденог огледала, A – површина попречног пресека, R – хидраулички радијус, I_0 – нагиб дна, C_r – коефицијент тангенцијалног напона.

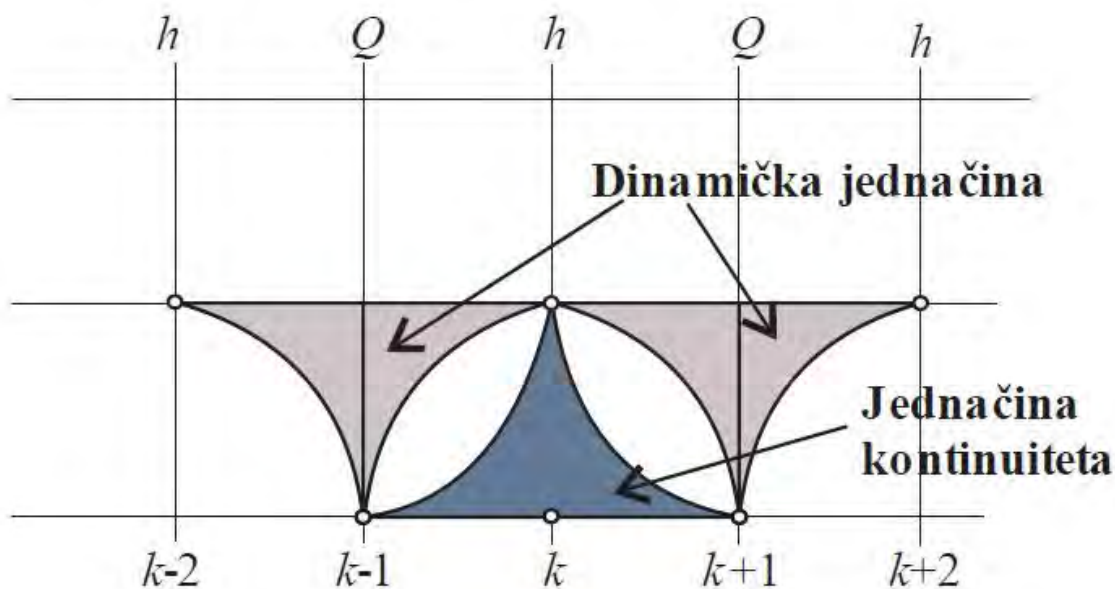
Једначина (1) представља једначину континуитета, док је једначина (2) динамичка једначина. У зависности од упрошћења динамичке једначине (2) користе се различити математички модели неустаљеног течења у отвореним токовима. За моделирање речних деоница у оквиру овог рада коришћен је математички модел дифузионог таласа који садржи чланове једначине (2) који се односе на утицаје трења и силе тежине, као и члан којим се у обзир узима и утицај успора. Поред ових чланова модел дифузионог таласа коришћен у овом раду разликује се од класичног модела због коришћења и члана $\frac{\partial Q}{\partial t}$ којим се у модел уводи и утицај повратног течења. На основу тога долази се до коначног облика динамичке једначине која је коришћена:

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + I_d + \frac{C_t}{2g} \frac{Q^2}{A^2 R} = 0 \quad (3)$$

Једначине (1) и (3) чине математички модел дифузионог таласа којим се описује неустаљено течење на речним деоницама између суседних хидроелектрана.

3.3 Нумерички модел

Једначине (1) и (3) дискретизују коначним разликама на смакнутој рачунској схеми на којој се наизменично мењају пресеци у којима се рачунају проток Q и дубина h . Иводи по времену дискретизују се разликама унапред, док се изводи по простору дискретизују централним разликама.



Слика 3. Нумеричка схема за модел дифузионог таласа

Дискретизацијом једначина математичког модела према претходној рачунској схеми долази се до следећих једначина које је потребно решавати:

$$h_k^{n+1} = h_k^n - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$Q_{k+1}^{n+1} = \frac{\frac{Q_{k+1}^n}{g \left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + I_d - \frac{h_{k+2}^{n+1} - h_k^{n+1}}{\Delta x}}{\frac{1}{g \left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + K_1^* |Q_{k+1}^n|} \quad (5)$$

$$K_1^* = \frac{n^2}{\left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{R_{k+2}^{n+1} + R_k^{n+1}}{2} \right)^{2/3}} \quad (6)$$

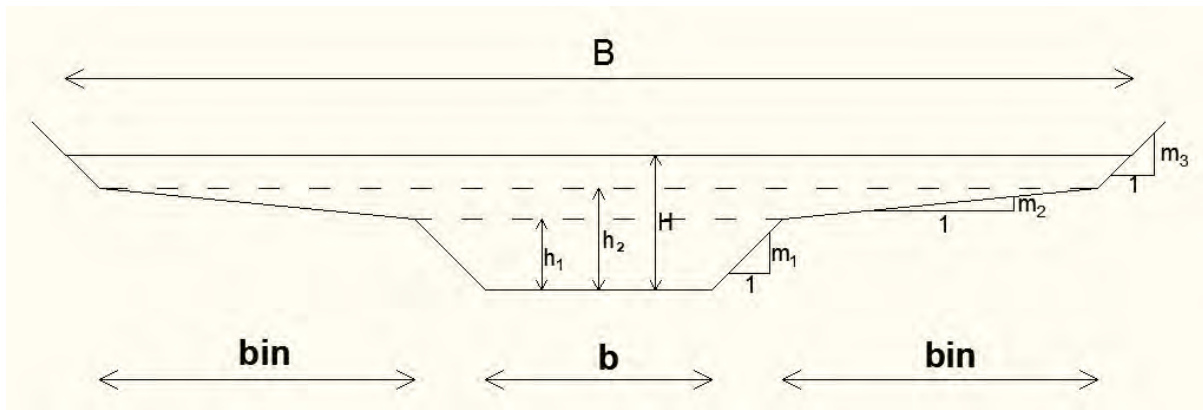
У једначинама (5) и (6) може се видети да се уместо коефицијента тангенцијалног напона C_t користи Манингов коефицијент храпавости n . Разлог за коришћење Манинговог коефицијента храпавости је његова мања промена у односу на коефицијент тангенцијалног напона.

Претходне једначине, које чине нумерички модел акумулације, су експлицитне и као такве потребно је да задовоље CFL услов стабилности нумеричке схеме:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} \quad (7)$$

Где је Δt – коришћени временски корак, Δx – просторни корак а c – стварна брзина пропагације поремећаја.

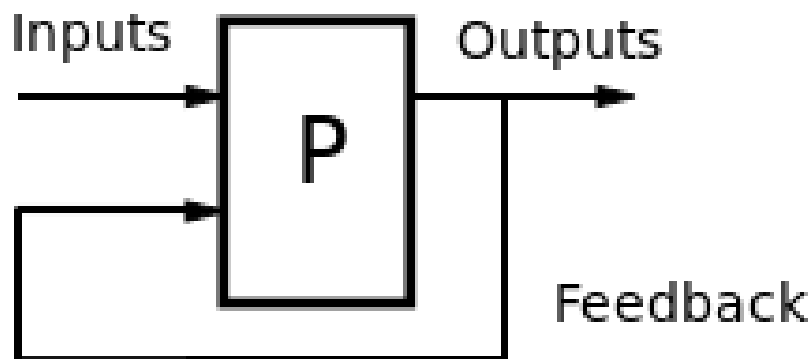
Временски корак коришћен у моделу је износио 2 секунде. Гранични услови се такође једноставно укључују у модел. Узводни гранични услов адаје се у виду хидрограма, што се може видети и на рачунској схеми. За најузводнију акумулацију узводни гранични услов задаје се коришћењем елемента Хидрограм у ком се задају вештачки или осмотрени хидрограми. За остале акумулације узводни гранични услов такође се задаје у виду хидрограму, с тим да сада тај хидрограм настаје као збир онога што се турбинира и оног дела који се прелива преко преливних објеката. Низводни гранични услов у оквиру акумулације представљен је најнизводнијим пресеком у ком се рачуна дубина. Као најчешћи низводни гранични услови задају се дубина или веза између дубине и протока (крива протицаја) док се у овом случају користи мало другачији низводни гранични услов. Као низводни гранични услов у моделу управљања каскадним хидроенергетским системом користи се PID контрола, која заједно са једначинама преливања и турбинама чини сложенији гранични услов. Начелно и такав гранични услов представља везу између дубине и протока, али таква веза је последица управљања за разлику од криве протицаја која се може сматрати „природним“ граничним условом.



Слика 4. Апроксимиран попречни пресек речног корита

3.4 Концептуални дизајн модела (примена PID контроле)

PID (пропорционално – интегративно - деривативна) контрола је математички апарат контроле који се најчешће користи у индустријским процесима.. Основна одлика оваквог апарата је та што је то систем са повратном спрегом (енг. Feedback), тј. излаз из оваквог система утиче на наредне вредности улаза у систем.



Слика 5. Схематски приказ система са повратном спрегом

Управо у природи повратне спреге треба сагледати улогу и сврху PID контроле. PID континуално рачуна вредност грешке e (error) која представља разлику између тренутне, измерене, вредности процесне променљиве (proces variable) која се жели контролисати, неке референтне вредности (setpoint) коју би требало достићи и претходних вредности грешака. PID контрола тежи да смањи вредност грешке током времена подешавањем контролне променљиве u (control variable).

$$u = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

На основу претходног, посматрајући схему система са повратном спрегом (слика 5.) може се закључити да улази (inputs) у систем (PID контрола) представљају грешку e (error) коју током времена треба што више приближити нули (тада је одступање процесне променљиве од референтне вредности најмање). Одређеним математичким

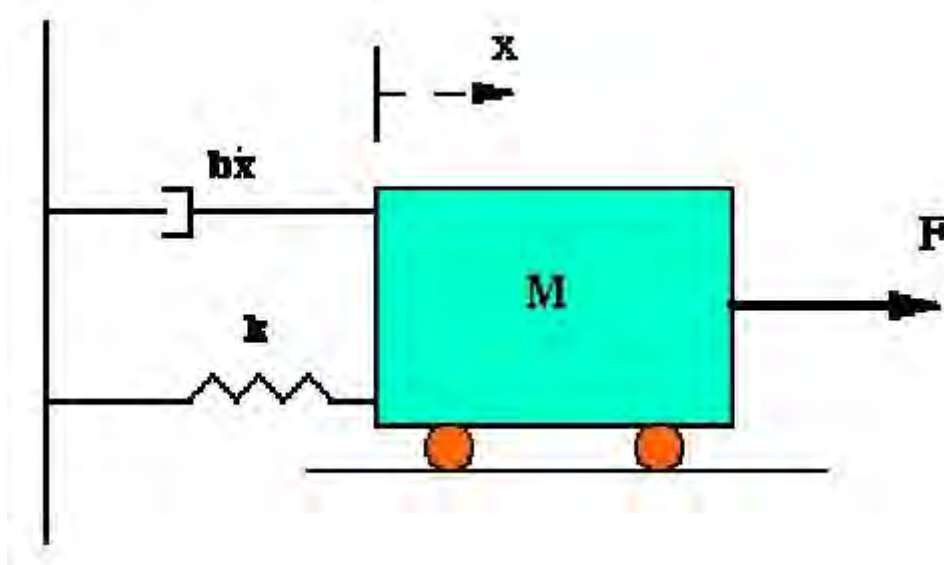
апаратом, који је приказан једначином (8), формира се излаз из система (outputs) који преко повратне спреге утиче на наредне вредности улаза, у овом случају грешке e (error). У овом случају систем са повратном спрегом чини PID контрола. Оно што је битно је сагледати како поједини параметри који чине систем (PID контролу) утичу на излаз из система и наредне улазе и на основу тога одредити вредности параметара који задовољавају одређене критеријуме управљања.

У конкретном случају који је везан за управљање ХЕС процесна променљива коју треба одржавати је ниво непосредно уз преливни објекат, јер он представља бруто пад на посматраној ХЕ (од тога зависи проиводња електричне енергије), преко излазног протока као контролне променљиве. Општа веза између ове две променљиве има следећи облик:

$$q_{izl} = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (9)$$

Где је K_p – пропорционални коефицијент, K_I – интегративни коефицијент и K_d – деривативни коефицијент, који се често обележавају као P , I и D , респективно, $e(t) = (h(t) - h_{ref}) / h_{ref}$ - грешка (бездимензионална вредност нивоа уз прелив), а $q_{izl} = (Q(t) - Q_{ref}) / Q_{ref}$ - контролна променљива (бездимензионални излазни проток).

Како би се јасније сагледао утицај појединих параметара који описују систем као што је PID контрола, посматраће се механички систем приказан на слици 6.

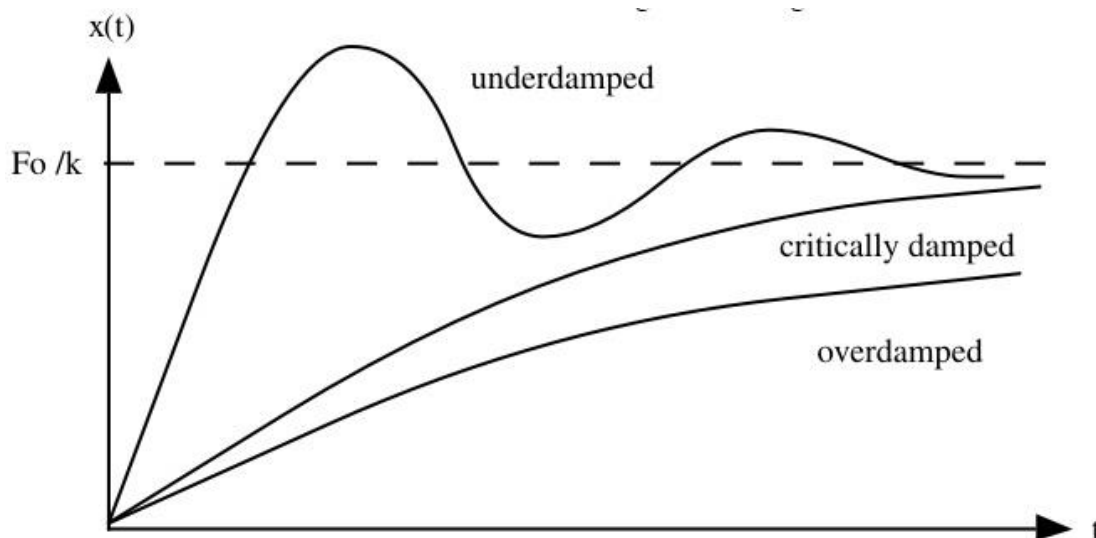


Слика 6. Механички систем који осцилује

Систем приказан на слици 6. представља механички систем који се неком силом F изводи из равнотежног положаја, и побуђује на осцилације. Одступање од референтног положаја представљено је положајем X . Математички модел механичког система (слика 6.) дат је следећом једначином [10]:

$$M \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + b \frac{\partial X}{\partial t} + kX = F \quad (10)$$

Величине M , b и k су карактеристике система (маса, пригушење и крутост, респективно), док је X одступање од референтног положаја а F излаз из система. У зависности од карактеристика система разликоваће се излаз из система, а самим тим и тренуци поновног успостављања референтног положаја и амплитуде осцилација.



Слика 7. Изглед излаза из система у зависности од карактеристика система [10]

Уколико се претходна прича о динамици система који се побуђују на осциловање примени на конкретан проблем који се испитује у оквиру мастер рада, а то је осциловање нивоа уз хидроелектрану, увиђа се паралела између појединих величина које описују један општи динамички систем (слика 6.) и PID контроле, где се одступање од референтног положаја може заменити грешком e (бездимензионална вредност одступања нивоа од референтног), излаз F може заменити бездимензионалним излазним протоком q_{izl} , док се карактеристике система, маса, крутост и пригушење, могу заменити коефицијентима K_p , K_i и K_d .

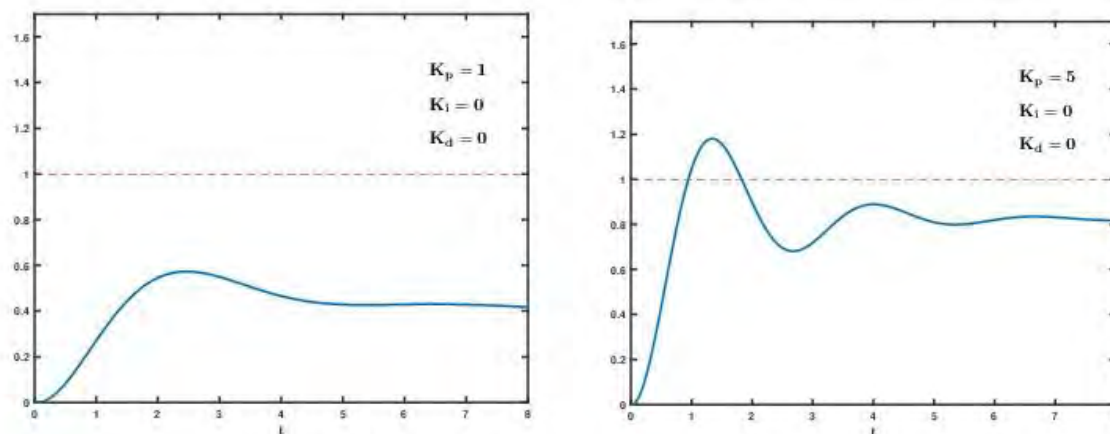
Када се систем описан једначином (9) побуди на осциловање одскочном функцијом (у једном тренутку референтни ниво се нагло мења, прелази са 0 на 1), успостављање новог референтног нивоа зависи од вредности параметара PID контроле. Утицај појединих вредности параметара је описан у наредним подпоглављима.

3.4.1 Пропорционална компонента P

Пропорционална компонента PID контроле генерише излаз из система који је пропорционалан тренутној вредности грешке. Пропорционална компонента је представљена као:

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (11)$$

Велике вредности пропорционалног коефицијента K_p дају велике излазе, сходно изразу (11). Уколико су вредности овог коефицијента превелике, може доћи до нестабилности система, тј. осцилације ће се повећавати временом уместо да се смањују. У супротном, уколико су вредности излаза који се добијају пропорционалном компонентом премали, систем неће бити у стању да адекватно реагује на промене.



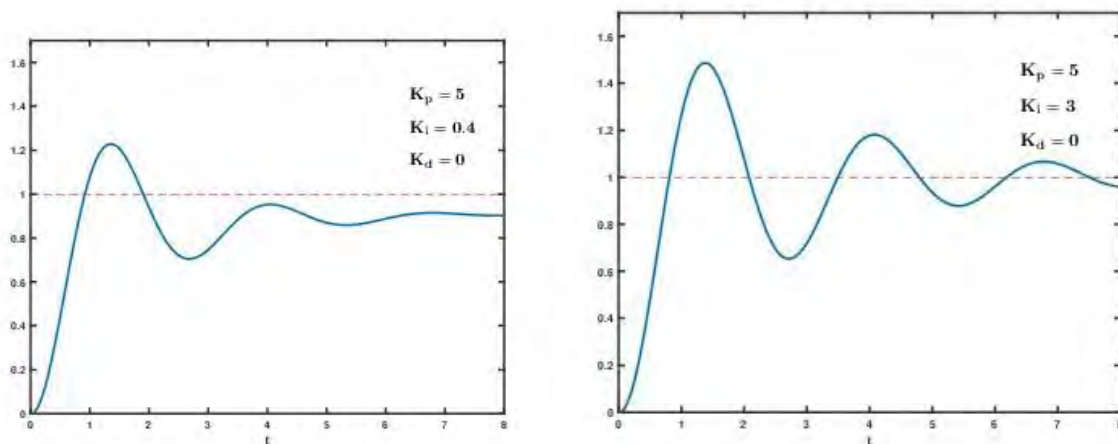
Слика 8. Утицај различитих вредности K_p на реакцију система

3.4.2 Интегративна компонента

Утицај интегративне компоненте се уочава када су у питању вредности амплитуде и времена успостављања референтног нивоа. Интегративна компонента сумира вредности грешака из претходног периода и формира једну „већу“ грешку која помножена са интегративним коефицијентом даје излаз интегративне компоненте.

$$I = K_I \cdot \int_0^t e(t) dt \tag{12}$$

Интегративна компонента убрзава процес устаљивања и смањује вредност крајњег одступања од референтног нивоа (положаја), које је знатно веће када се користи само пропорционална компонента. Када се интегративна компонента користи са пропорционалном, такав вид контроле назива се *PI* контрола.



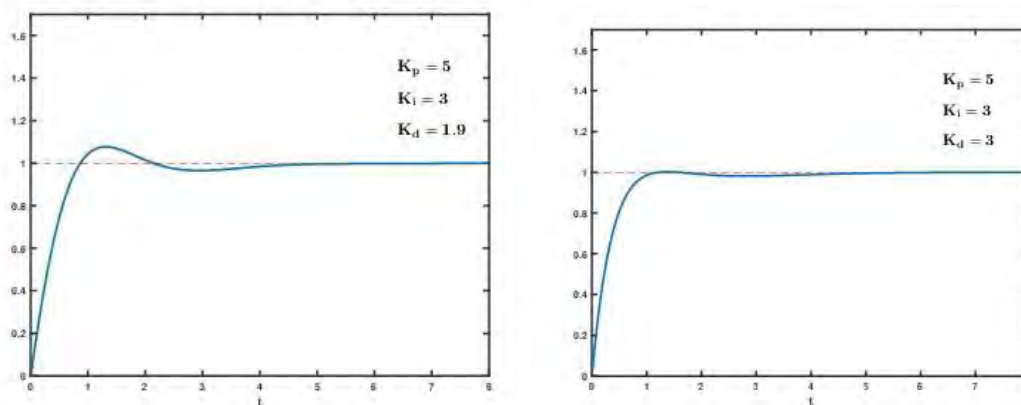
Слика 9. Утицај различитих вредности коефицијента K_I (вредност K_p је константна)

3.4.3 Деривативна компонента

Вредност деривативне компоненте утврђује се на основу нагиба промене грешке e у току времена. Деривативна компонента се односи на будуће вредности грешке, тако што екстраполује будуће вредности грешке на основу претходних грешака.

$$D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{13}$$

Оно што је карактеристично за деривативну компоненту је то да поседује филтер, којим се ограничава коришћење деривативне компоненте, тачније, због појаве шума који омета рад деривативне компоненте, ограничава се нагиб грешке на који деривативна контрола треба да реагује, у супротном деривативна компонента може учинити систем нестабилним. Када се правилно употребљава, деривативна компонента смањује икупно одступање од референтног положаја.



Слика 10. Утицај деривативне компоненте (K_p и K_I су константни)

3.4.4 Хеуристички приступ подешавању параметара PID – а

Међу различитим методама за подешавање параметара PID контроле, као један од најчешће коришћених је хеуристички приступ или Циглер – Николсов (Ziegler - Nichols) приступ. Сам приступ је пробног типа (отуда и хеуристички). За почетак интегративни и деривативни коефицијенти се подешавају на нулу. Након тога вредности пропорционалног коефицијента се повећавају све док неке вредности K_u , за коју излаз из система, у овом случају излазни проток не добије стабилне осцилације за које се може одредити периода осциловања T_u . На основу тако одређених вредности K_u и T_u , а у зависности од типа контроле која се користи, врши се подешавање параметара на начин приказан у следећој табели:

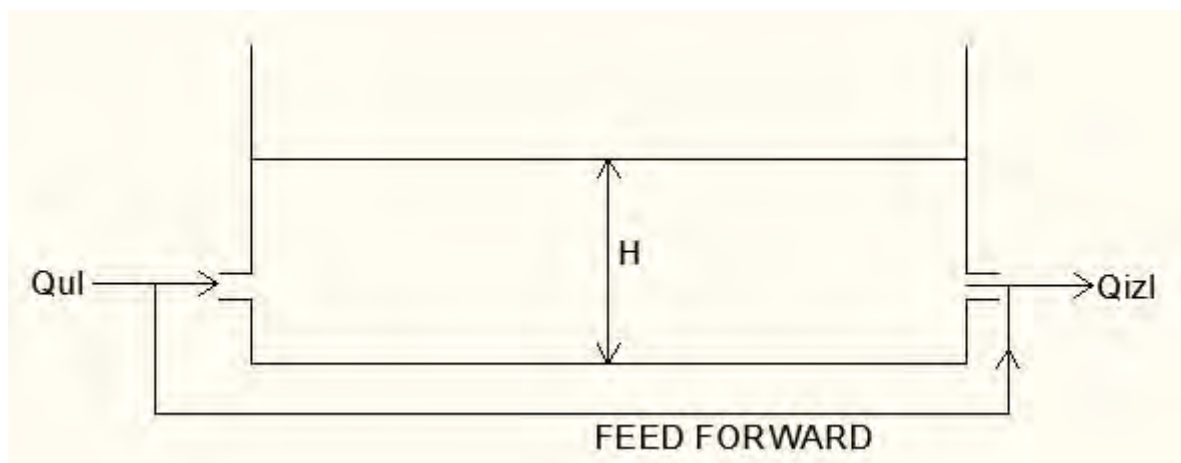
Тип контроле	K_p	K_I	K_d
P	$0,5 K_u$	/	/
PI	$0,45 K_u$	$1,2/T_u$	/
PD	$0,8 K_u$	/	$K_p T_u/8$
PID	$0,6 K_u$	$2/T_u$	$T_u/8$

Табела 1. Подешавање контролних параметара применом методе Зиглер – Николса

3.4.5 Увођење FEED FORWARD компоненте

Чести су случајеви када се користе само неке од компоненти PID – а за контролу, па се често јављају PI или PD контроле. За модел управљања каскадним хидроенергетским системом, коришћен је ПИ облик контроле уз додатну компоненту чији је циљ да побољша рад ПИ контроле. Имајући у виду да је каскадни хидроенергетски систем систем у ком су хидроелектране повезане у низу и да излаз из једне од акумулација представља улаз у низводну, уводи се компонента којом се преноси информација са узводне на низводну акумулацију, односно хидроелектрану, тзв. FEED FORWARD.

Без FEED FORWARD компоненте, PID или ПИ контрола врши тзв. локалну регулацију протока, јер користи само информације о дубини из најнизоводнијег пресека. Међутим, ако се (на тренутак) акумулација посматра као обичан резервоар, занемарујући динамику у акумулацији до које долази услед пропагације поремећаја, види се да би се увођењем FEED FORWARD компоненте, на основу једначине континуитета написане за резервоар, испуштао онолики проток колики је и на улазу, чиме би се ниво одржавао константним.



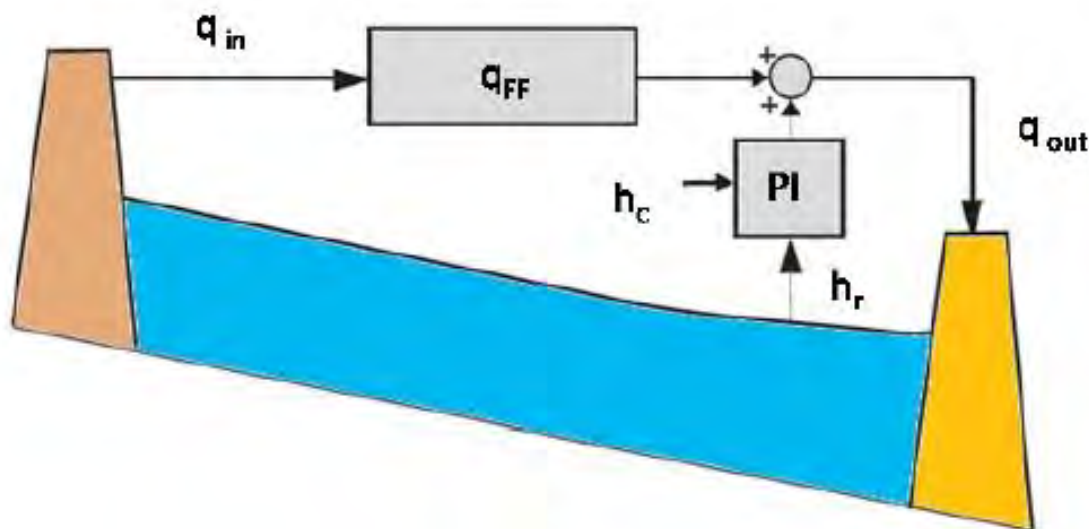
Слика 11. Схема акумулације представљене као резервоар

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_{ul} - Q_{izl}}{A} \wedge \text{feedforward} \Rightarrow Q_{ul} = Q_{izl} \Rightarrow dH = 0 \Rightarrow H = \text{const.} \quad (14)$$

Међутим, пошто се у реалности динамика у акумулацији не може занемарити, FEED FORWARD компонента се уводи како би се побољшале перформансе ПИ контроле. Увођењем FEED FORWARD компоненте добија се следећа једначина:

$$q_{izl} = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + q_{ff} \quad (15)$$

Где је q_{ff} средња вредност протока у претходном временском периоду у који улази у акумулацију, односно излази из узводне акумулације.



Слика 12. Схематски приказ побољшане PI контроле (PI + FEED FORWARD) [8]

Претходно је напоменуто да PID контрола мери грешку у току времена и у зависности од тога која од комбинација контроле се користи прилагођава излазну величину (control variable) у циљу смањења одступања. Пошто су сама мерења подложна различитим грешкама, потребно је испитати и њихов утицај. Грешке у мерењу нивоа могу да се поделе на две групе: грешке настале услед погрешне калибрације или услед лошег уређаја који има постепено клизање калибрације. Како би се испитао могући утицај грешака мерења нивоа на улазни сигнал PID контроле генерисан је вештачки шум у облику синусоиде са фреквенцијом од $f_z=0.1$ Hz и амплитудом од 0.1 m, а резултати испитивања утицаја шума дати су у поглављу Резултати.

4 Пример примене модела управљања каскадним ХЕС

4.1 Опис каскадног хидроенергетског система

Као што је у уводу напоменуто, за тестирање модела управљања каскадним хидроенергетским системом формиран је фиктивни хидроенергетски систем. За формирање поменутог система искоришћена је деоница Велике Мораве, дужине 2066 m.

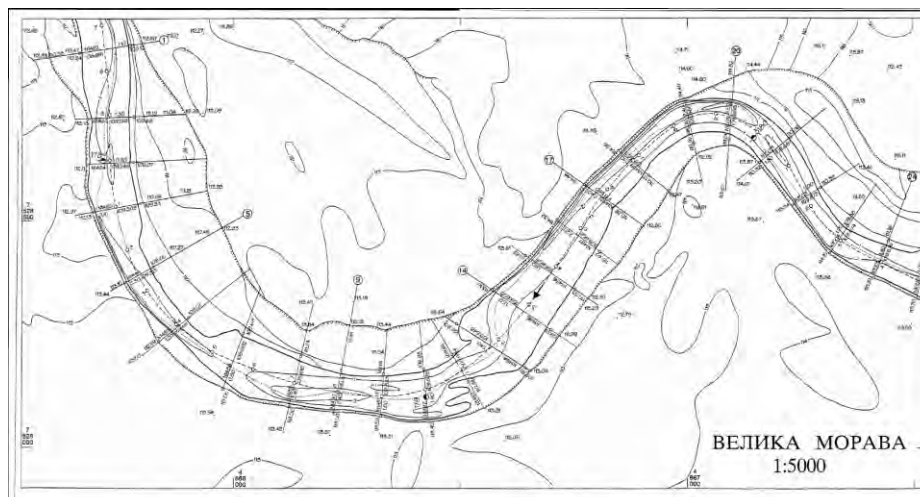
Сама Велика Морава поседује одређени неискоришћени хидроенергетски потенцијал, о чему сведоче и ралицити документи у којима се помиње могућност изградње хидроенергетско – пловидбеног пута „Морава“ који би био регулисан каскадним акумулацијама. Велику Мораву карактеришу мали подужни падови, па на основу тога спада у равничарске реке са малим простором за формирање већих акумулација. На основу претходног, стиче се утисак да анализа рада једног каскадног система, макар он био и фиктиван, има смисла.

На основу природне геометрије ове деонице формирана је „призматична“ деоница коју карактеришу попречни пресеци облика представљеног на слици 4. Речна деоница, акумулација, описана је са 20 апроксимираних попречних пресека, док је програмским кодом предвиђена интерполација на додатне рачунске пресеке (експлицитно се задаје жељени број додатних рачунских пресека између постојећих). На тај начин формирана је једна акумулација. Због мањка података о природној геометрији низводног дела Велике Мораве, каскадни хидроенергетски систем формиран је на тај начин да су све акумулације исте што се тиче геометрије. Формиран је фиктивни хидроенергетски систем (у даљем тексту ХЕС Велика Морава) од десет каскадно повезаних проточних хидроелектрана. Као идеја за формирање оваквог система послужило је решење које се предвиђа за хидроенергетски систем на Ибру [8].

Свака акумулација је описана апроксимираним коритом. За разлику од природног корита раматране деонице Велике Мораве која се састоји од две веће кривине, апроксимирано корито је формирано тако да буде праволинијско исте дужине као и природно корито. Укупна дужина разматраног ХЕС Велика Морава је 20,66 км.

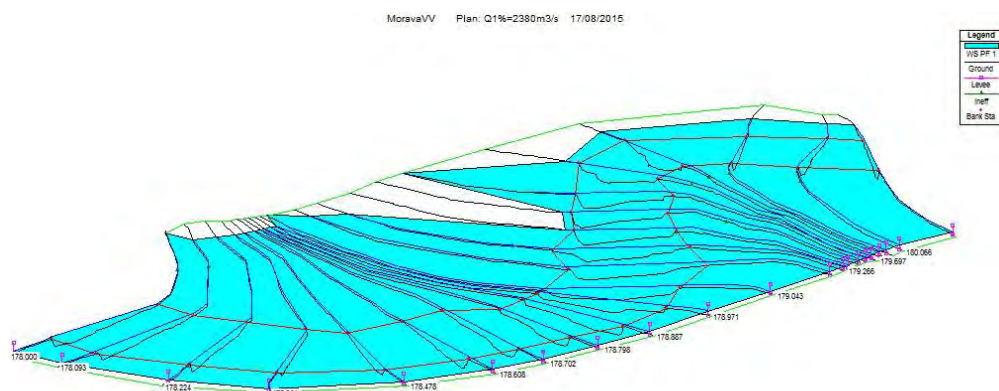


Слика 13. Локација коришћене деонице Велике Мораве за формирање једне фиктивне акумулације



Слика 14. Топографска подлога разматране деонице

Као што је већ поменуто, Велику Мораву карактеришу мали подужни падови, што је и у овом примеру случај. При моделирању фиктивне, апроксимиране акумулације узет је средњи пад на деоници који износи 0,02 %. На слици 4. могу се видети основне величине којима се описује апроксимирана геометрија корита. То су ширина при дну минор корита b , висина минор корита h_1 , ширина инундација b_{in} , као и нагиби косина у минор кориту m_1 , нагиб плавних површина m_2 и нагиб на косинама које припадају инундацијама m_3 . У моделу ХЕС Велика Морава ширина b варира у малим границама око 20 м, висина минор корита h_1 креће се од 1 до 5 м. Ширина инундација варира у опсегу од 350 до 440 м. За све попречне пресеке усвојене су исте вредности нагиба косина, нагиб m_1 је 1, m_2 је 0,05 док је m_3 једнако 1. Међутим, треба нагласити да је у оквиру програмског кода написаног у оквиру елемента Акумулација предвиђено и задавање другачијих вредности за сваки пресек понаособ, при чему се за додатне рачунске пресеке те вредности добијају линеарном интерполацијом на основу чега би се добило благо заталасано корито које би се даљим модификацијама постепено приближавало природнијем облику корита.



Слика 15. 3D изглед природне деонице Велике Мораве извучен из програмског пакета Hec-Ras

Како би се сагледао утицај апроксимације геометрије корита упоређене су линије нивоа добијене при устаљеном течењу за задат низводни гранични услов, који би требало да представља и вредност нивоа коме уз преливни објекат коме ће се тежити при управљању.

За прорачун линије нивоа за природну геометрију коришћен је програмски пакет Hec-Ras, док је линија нивоа за апроксимирано корито добијена решавањем енергетске једначине од пресека до пресека методом постепеног приближавања.

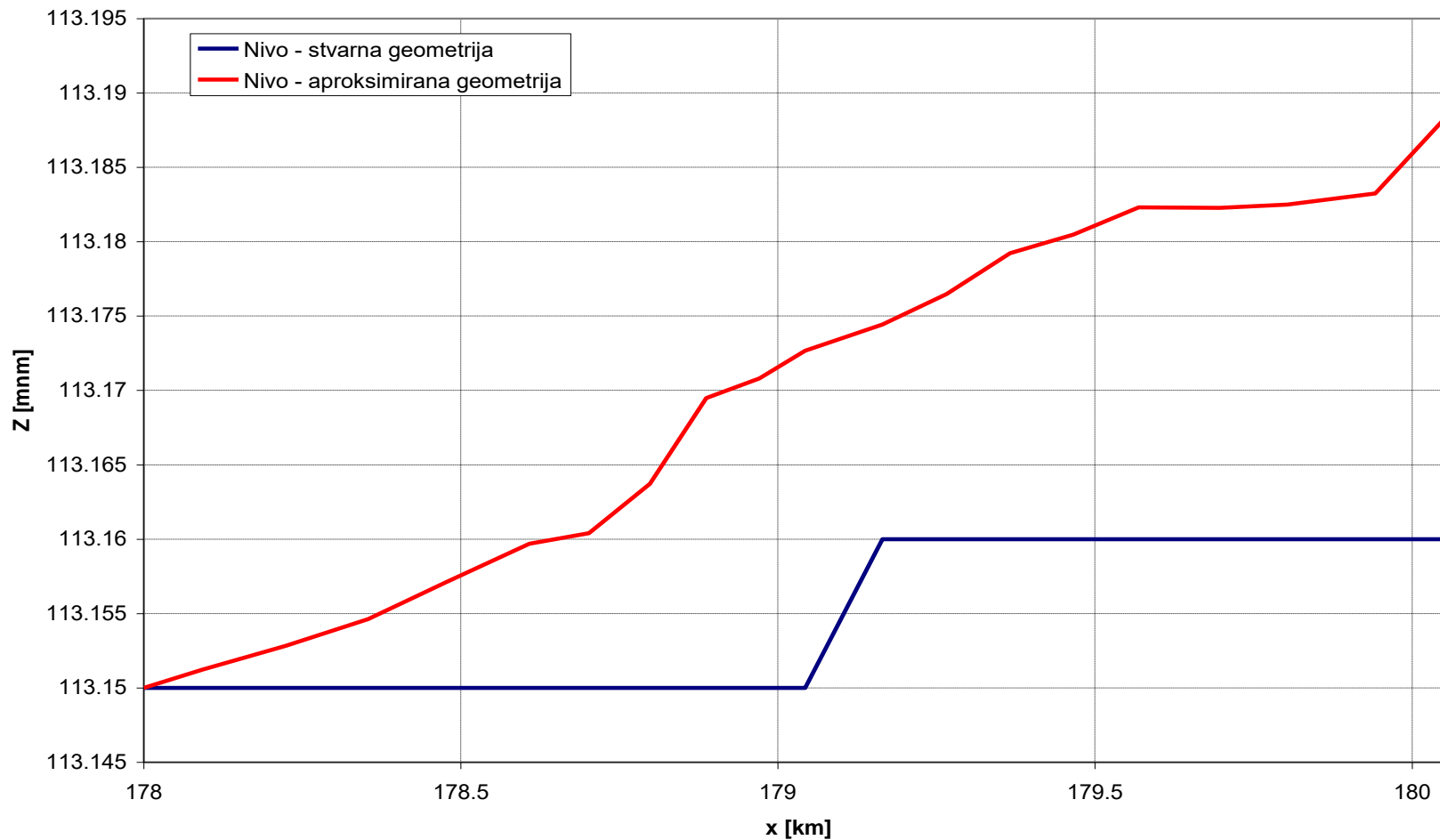
Tabela 1. Linija nivoa za prirodnu geometriju dobijena iz programskog paketa Hec-Ras $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

Stacionaza	Q	Zd	A	V	Z	E
(km)	(m ³ /s)	(m)	(m ²)	(m/s)	(m)	(m)
178	100	108.24	783.89	0.13	113.15	113.15
178.093	100	108.21	833.86	0.13	113.15	113.15
178.224	100	108.4	853.37	0.13	113.15	113.15
178.354	100	108.46	800.12	0.14	113.15	113.15
178.478	100	108.79	725.81	0.15	113.15	113.15
178.608	100	107.23	664.35	0.15	113.15	113.15
178.702	100	107.23	665.81	0.15	113.15	113.15
178.798	100	107.82	590.66	0.17	113.15	113.15
178.887	100	107.76	758.51	0.13	113.15	113.16
178.971	100	108.26	655.6	0.15	113.15	113.16
179.043	100	108.29	779.82	0.13	113.15	113.16
179.165	100	108.12	742.93	0.14	113.16	113.16
179.266	100	108.05	628.82	0.16	113.16	113.16
179.366	100	107.47	710.3	0.16	113.16	113.16
179.466	100	107.29	664.53	0.17	113.16	113.16
179.569	100	107.54	608.21	0.18	113.16	113.16
179.697	100	107.32	506.75	0.2	113.16	113.16
179.803	100	107.26	485.15	0.21	113.16	113.16
179.942	100	108.33	439.21	0.23	113.16	113.16
180.066	100	107.67	427.06	0.23	113.16	113.16

Табела 2. Линија нивоа за апроксимирано речно корито $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

Presek	Stacionaza [km]	Stacionaza [m]	Δx [m]	Zd	H' [m]	A [m ²]	O [m]	R [m]	V _i [m/s]	H ⁱ⁺¹ [m]	C _i	Z [mm]	E
1	178	178000		108.24	4.910	792.682	740.547	1.070	0.126	4.910	4.941	113.150	113.151
2	178.093	178093	93	108.21	4.941	843.899	790.713	1.067	0.118	4.941	4.753	113.151	113.152
3	178.224	178224	131	108.4	4.753	860.558	859.246	1.002	0.116	4.753	4.694	113.153	113.154
4	178.354	178354	130	108.46	4.695	777.478	895.836	0.868	0.129	4.695	4.367	113.155	113.155
5	178.478	178478	124	108.79	4.367	691.909	880.349	0.786	0.145	4.367	5.930	113.157	113.158
6	178.608	178608	130	107.23	5.930	955.896	627.532	1.523	0.105	5.930	5.931	113.160	113.160
7	178.702	178702	94	107.23	5.930	768.178	806.764	0.952	0.130	5.930	5.342	113.160	113.161
8	178.798	178798	96	107.82	5.344	473.424	810.155	0.584	0.211	5.344	5.410	113.164	113.166
9	178.887	178887	89	107.76	5.409	831.901	823.740	1.010	0.120	5.409	4.911	113.169	113.170
10	178.971	178971	84	108.26	4.883	682.108	879.111	0.776	0.147	4.911	4.883	113.171	113.172
11	179.043	179043	72	108.29	4.883	862.802	917.130	0.941	0.116	4.883	5.054	113.173	113.173
12	179.165	179165	122	108.12	5.054	750.782	870.376	0.863	0.133	5.054	5.126	113.174	113.175
13	179.266	179266	101	108.05	5.126	585.031	689.552	0.848	0.171	5.126	5.710	113.176	113.178
14	179.366	179366	100	107.47	5.709	731.641	541.089	1.352	0.137	5.709	5.891	113.179	113.180
15	179.466	179466	100	107.29	5.890	687.461	611.775	1.124	0.145	5.890	5.642	113.180	113.182
16	179.569	179569	103	107.54	5.642	2405.129	524.309	4.587	0.042	5.642	5.862	113.182	113.182
17	179.697	179697	128	107.32	5.862	1579.680	660.861	2.390	0.063	5.862	5.923	113.182	113.182
18	179.803	179803	106	107.26	5.922	3067.452	626.611	4.895	0.033	5.922	4.853	113.182	113.183
19	179.942	179942	139	108.33	4.853	593.375	679.617	0.873	0.169	4.853	5.517	113.183	113.185
20	180.066	180066	124	107.67	5.519	442.142	670.760	0.659	0.226	5.519	5.275	113.189	113.192

Linije nivoa za prirodnu i aproksimiranu geometriju

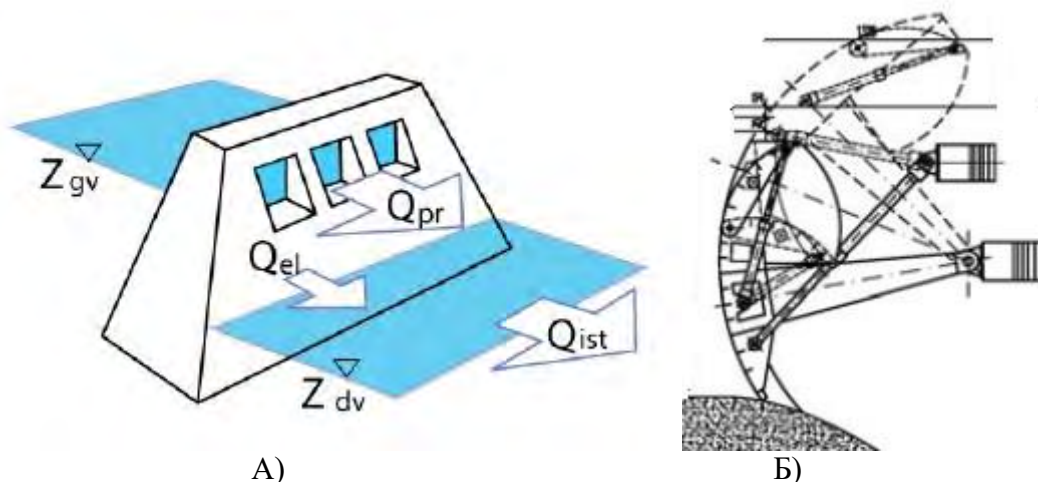


Слика 16. Линије нивоа за природно и апроксимирано корито

Хидроелектране које су описане тако да се састоје од по два агрегата укупног инсталисаног протицаја од $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$, односно сваки од агрегата са по $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Предвиђено је да се агрегати пале на $15 \text{ m}^3/\text{s}$, с тим да је режим паљења агрегата такав да се у случају мањег протока од укупног инсталисаног, прво пали један агрегат до свог максимума од $50 \text{ m}^3/\text{s}$, док други агрегат ради са остатком расположивог протока. У случају расположивог протока мањег од инсталисаног капацитета једног агрегата, предвиђено је да ради само један агрегат. Предвиђено је и испуштање минималног протока у вредности од $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Када агрегати нису у функцији испуштање планираног минимума вршиће се преливањем преко преливних објеката.

За одржавање нивоа и преливање вишка воде предвиђене су сегментне уставе на чијем горњем делу се налазе покретне клапне. Улога сегментних устава је омогућавање евакуације воде услед наилаaska поплавних таласа, док се за регулацију протока у циљу одржавања жељеног нивоа користе преливне ротирајуће клапне. Преливне клапне дуже време постоје као једно од могућих решења за контролу преливања, али се тек у последњих десетак година интезивније користе. Регулисање нивоа и протока применом покретних, ротирајућих клапни је знатно финије у односу него у случају коришћења устава са истицањем. Преливне клапне се могу контролисати даљински или ручно, на лицу места уколико се даљински систем није у функцији. Ове уставе се по потреби подижу или спуштају и на тај начин врше регулисање преливања. У моделу је предвиђено да висина сегментне уставе буде 3 m , док је дужина преливне ротирајуће клапне 2 m . Клапна ротира око своје осе која се налази на врху сегментне уставе на месту на ком је монтирана клапна. Маневарски опсег клапне је $0^\circ - 90^\circ$, при чему се положај када је клапна вертикална узима као 0° док се положај у ком је клапна потуно спуштена узима као 90° . Угао θ којим се описује тренутни положај покретне клапне дефинише се као угао мерен од вертикалног положаја до положаја у ком се клапна налази.

Потребно је нагласити да се одржавање референтног нивоа у акумулацији одвија евакуацијом одређене количине воде из акумулације. Уколико је количина воде коју је потребно евакуисати мања од инсталисаног капацитета агрегата, управљање нивоом се врши испуштањем целокупне количине воде кроз агрегате. У супротном, када је вредност протока који је потребно евакуисати већи од инсталисаног, вишак воде се евакуише преливањем преко клапне.



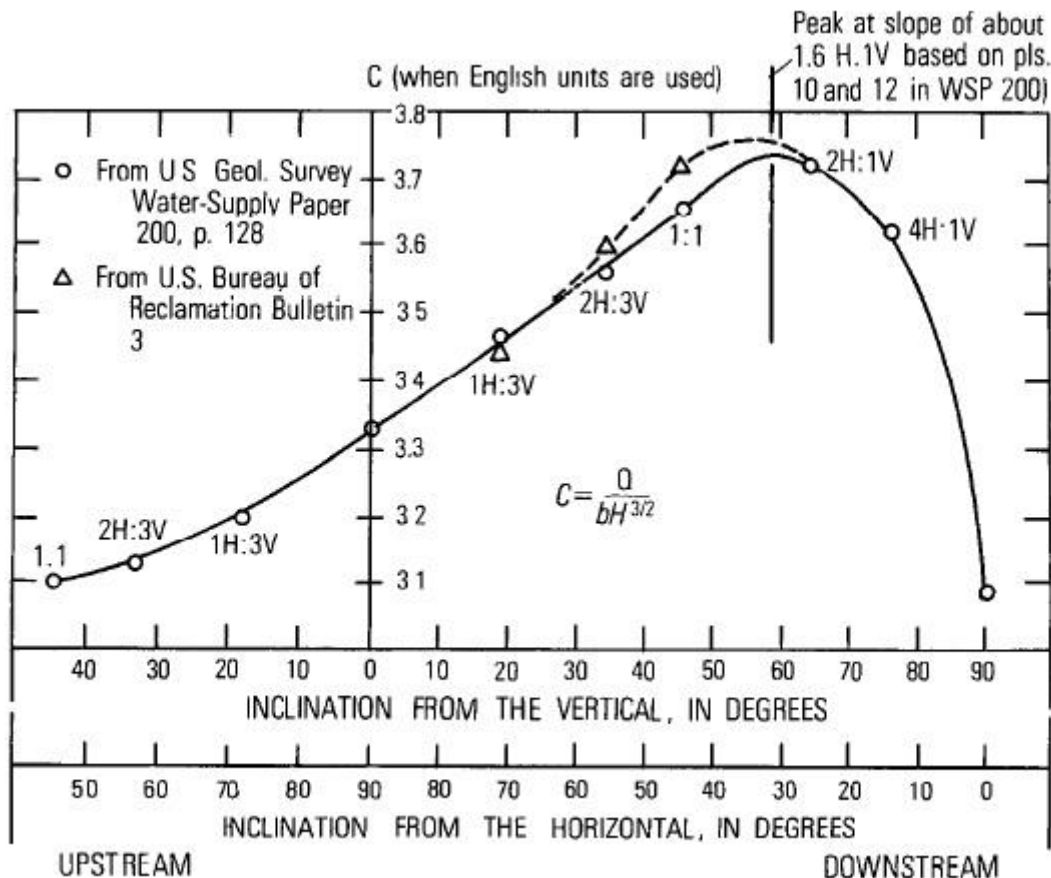
Слика 17. А) Схема рада хидроелектране; Б) Пример прелива контролисаног сегментном уставом са покретном клапном

Како је преливна клапна регулациони елемент преко кога вода прелива, за одређивање протока воде на преливу користи једначина преливања за стандардне правоугаоне преливе:

$$Q = mB\sqrt{2gH^3} \tag{16}$$

Где је Q – проток преко прелива, m – коефицијент преливања, B – ширина преливне ивице а H – висина преливног млаза.

Ротирањем клапне око осовине мења се и геометрија прелива а самим тим и струјнице које образују флуидни делићи мењају свој облик. Као последица тога долази о до промене коефицијента преливања m који се јавља у једначини 16. Како би се овај проблем узео у обзир коришћени су резултати испитивања промене коефицијента преливања за различите типове преливних уређаја, који су описани у литератури [7].



Слика 18. Промена коефицијента преливања са променом угла клапне изражено у империјалним јединицама

Превођењем вредности коефицијента преливања са империјалних на јединице SI ситема и утврђивањем корелације између вредности коефицијента преливања и угла клапне добија се веза у виду полинома шестог степена:

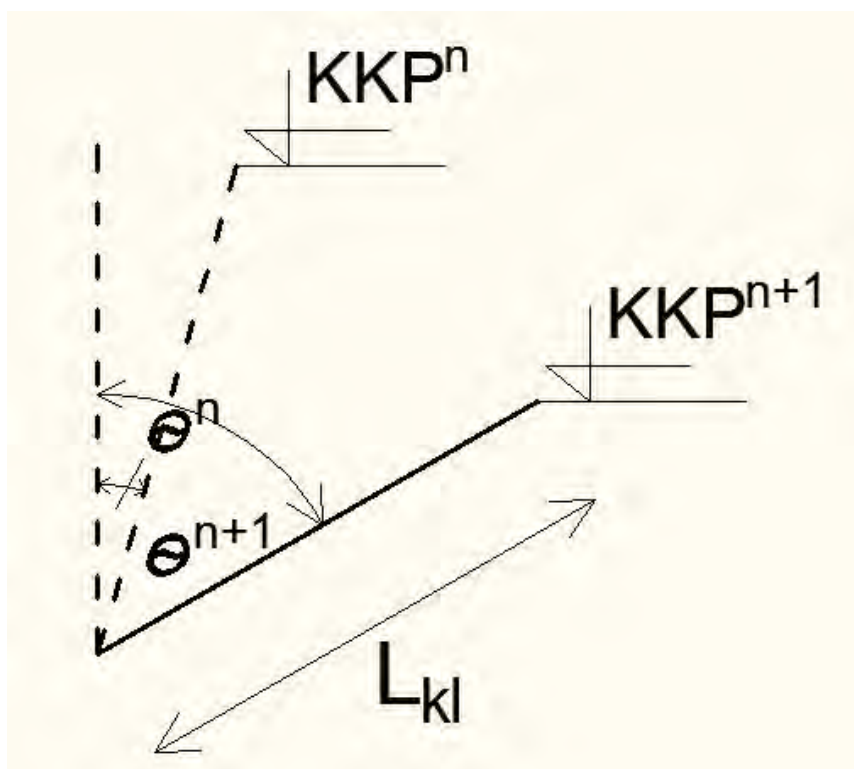
$$m = -5 \cdot 10^{-14} \theta^6 - 3 \cdot 10^{-11} \theta^5 + 10^{-9} \theta^4 + 6 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 2 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 0.0007 \cdot \theta + 0.4052 \tag{17}$$

У претходној једначини преливања (једначина 16), величина H представља висину преливног млаза која се може одредити као:

$$H = \left\{ \begin{array}{l} H_{br} - KKP, \quad H_{br} \geq KKP \\ 0, \quad H_{br} < KKP \end{array} \right\} \quad (18)$$

Где је H_{br} – дубина у пресеку непосредно уз прелив, а KKP – kota круне прелива о посматраном тренутку.

Да би се одредила kota круне преливне клапне потребно је познавати угаоноу брзину ротације покретне, преливне клапне. Када се зна вредност брзине kota круне прелива одређује се на следећи начин:



Слика 19. Схема покретне, преливне клапне

$$\theta^{n+1} = \theta^n \pm \omega \cdot \Delta t \quad (19)$$

$$KKP^{n+1} = KKP^n - L_{kl} (\cos \theta^n - \cos \theta^{n+1}) \quad (20)$$

Где је ω – угаона брзина ротације клапне, θ^n – вредност угла који означава положај клапне у претходном временском тренутку, θ^{n+1} – вредност угла који означава положај клапне у посматраном тренутку, KKP^n – kota круне прелива у претходном временском кораку, KKP^{n+1} – kota круне прелива у посматраном временском кораку, L_{kl} – дужина клапне и Δt – временски интервал.

4.2 Модел акумулације са PID контролом као моделом преградног објекта

Како би се сагледао утицај различитих вредности контролних параметара пропорционално – интегративно – деривативне контроле разматра се модел једне акумулације у Simulink – у. У ту сврху, од основних елемената којима се моделира хидроенергетски систем, коришћени су елементи Генератор Хидрограма и Акумулација. Елемент Акумулација (слика 1а) се користи како би се имплементирао код који представља нумерички модел неустаљеног течења у акумулацији методом дифузионог таласа.

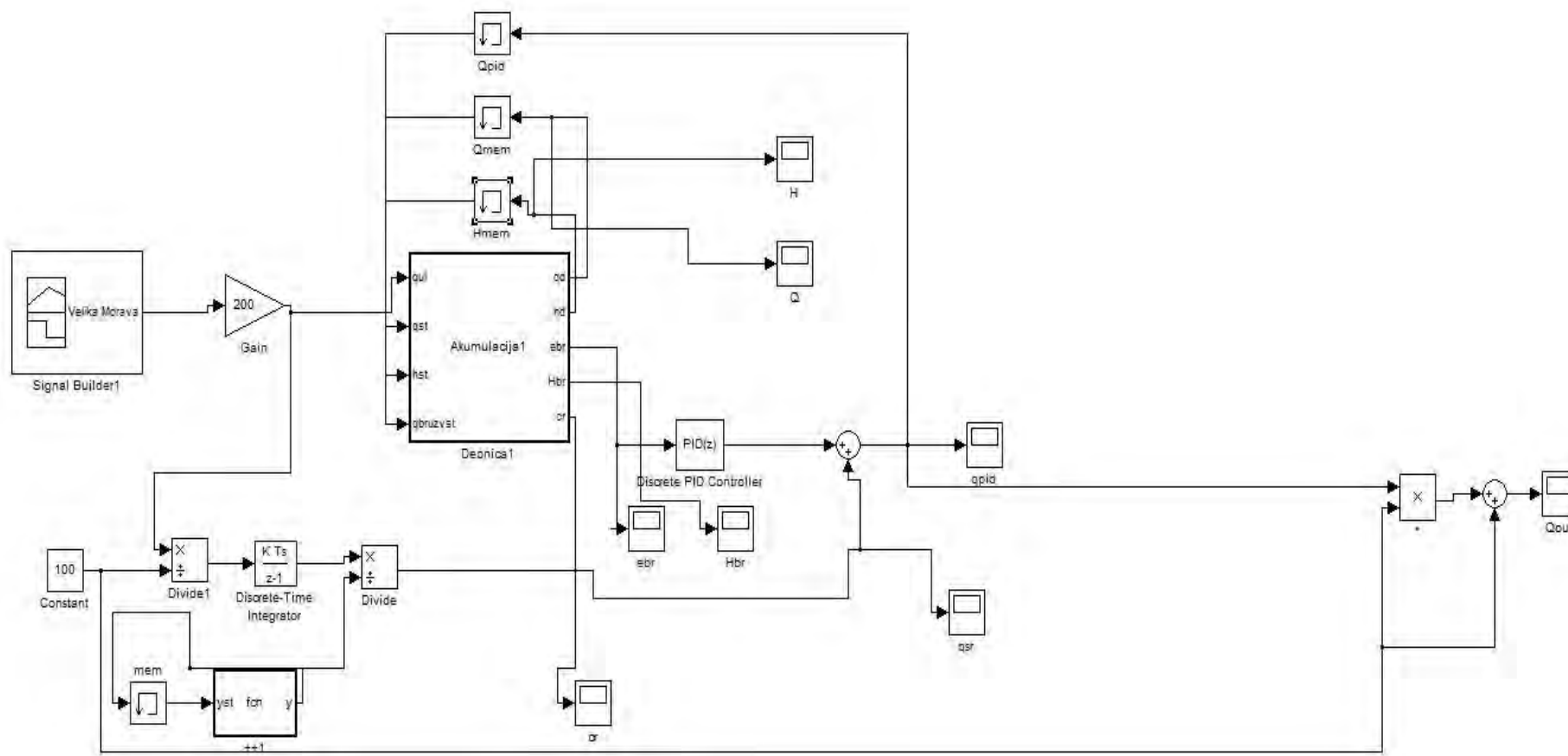
Рад преливних објеката и хидроелектране у оваквом моделу представљен је само вредношћу излазног протока, који се добија као резултат рада пропорционално – интегративно – деривативне контроле (PID). За овај случај неће се разматрати маневарске способности преливних уређаја, тј. уводи се претпоставка да њихов рад у потпуности одговара резултатима PID контроле.

Потребно је нагласити да се математички модел неустаљеног течења решава на смакнутој рачунској мрежи где се наизменично смењују пресеци у којима рачунамо вредности протока и дубине. Због тога, а на основу циља који је дефинисан као одржавање ниво воде непосредно уз прелив, потребно је акумулацију представити парним бројем пресека. Дубина у сваком другом пресеку добија се на основу вредности протока из два суседна пресека (слика 3.). Пошто је последњи пресек, уз хидроелектрану, онај у ком се рачуна дубина, као њему суседни са низводне стране узима се у ствари вредност протока која се испушта кроз хидроелектране и преко прелива, тј. у разматраном моделу вредност одређена PID контролом. Пошто вредност одступања нивоа у пресеку уз хидроелектрану као грешка утиче на вредност протока одређену преко PID контроле, а та вредност протока на вредност грешке у наредном временском кораку, формира се негативна повратна спрега која тежи да временом смањи вредност грешке.

Улазне вредности у модел добијају се преко Генератора Хидрограма, у ком се задаје одређени вештачки или осмотрени хидрограм. Улаз се задаје на најузводнијем пресеку у виду протока. Излаз из система у виду илазног хидрограма представља улаз у наредну акумулацију. PID контрола се примењује у облику приказаном у једначини 15., при чему се *feedforward* компонента за прву, најузводнију, акумулацију добија као средња вредност протока са улазног хидрограма у неком претходном временском периоду, а за остале акумулације на исти начин с тим да улаз код њих није условљен природним процесима, већ радом узводних хидроелектрана.

Као почетни услов на деоници, задате су одређене вредности протока и дубина. Због поједностављења модела, као почетни услов у погледу дубина нису задате одговарајуће линије нивоа, већ је за сваки од пресека узета иста вредност дубине од 5 m. Почетна вредност протока је 100 m³/s. Пошто циљ овог рада није решавање конкретног привредног проблема, већ анализа могућег алгоритма управљања, задати почетни услови, односно њихова једноставнија имплементација нема неког значајнијег утицаја на саму анализу.

Као вредности референтног нивоа ком треба тежити приликом управљања узима се такође вредност од 5 m, док се као поремећај у систем због ког би и требало управљати уводи одређени хидрограм поплавног таласа мањег интензитета (сматра се да каскадни ХЕС не раде у случајевима великих поплавних таласа).

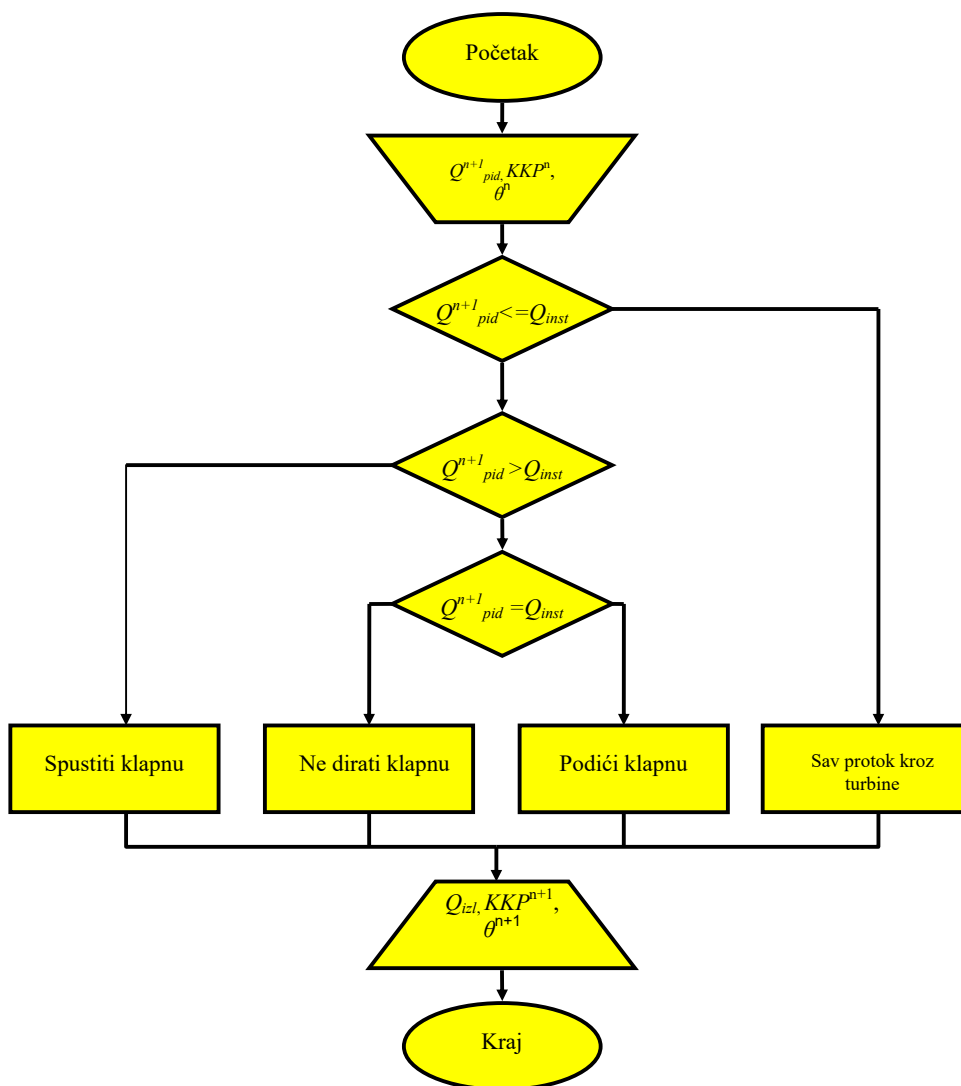


Слика 20. Модел једне акумулације са PID контролом као моделом преградног објекта

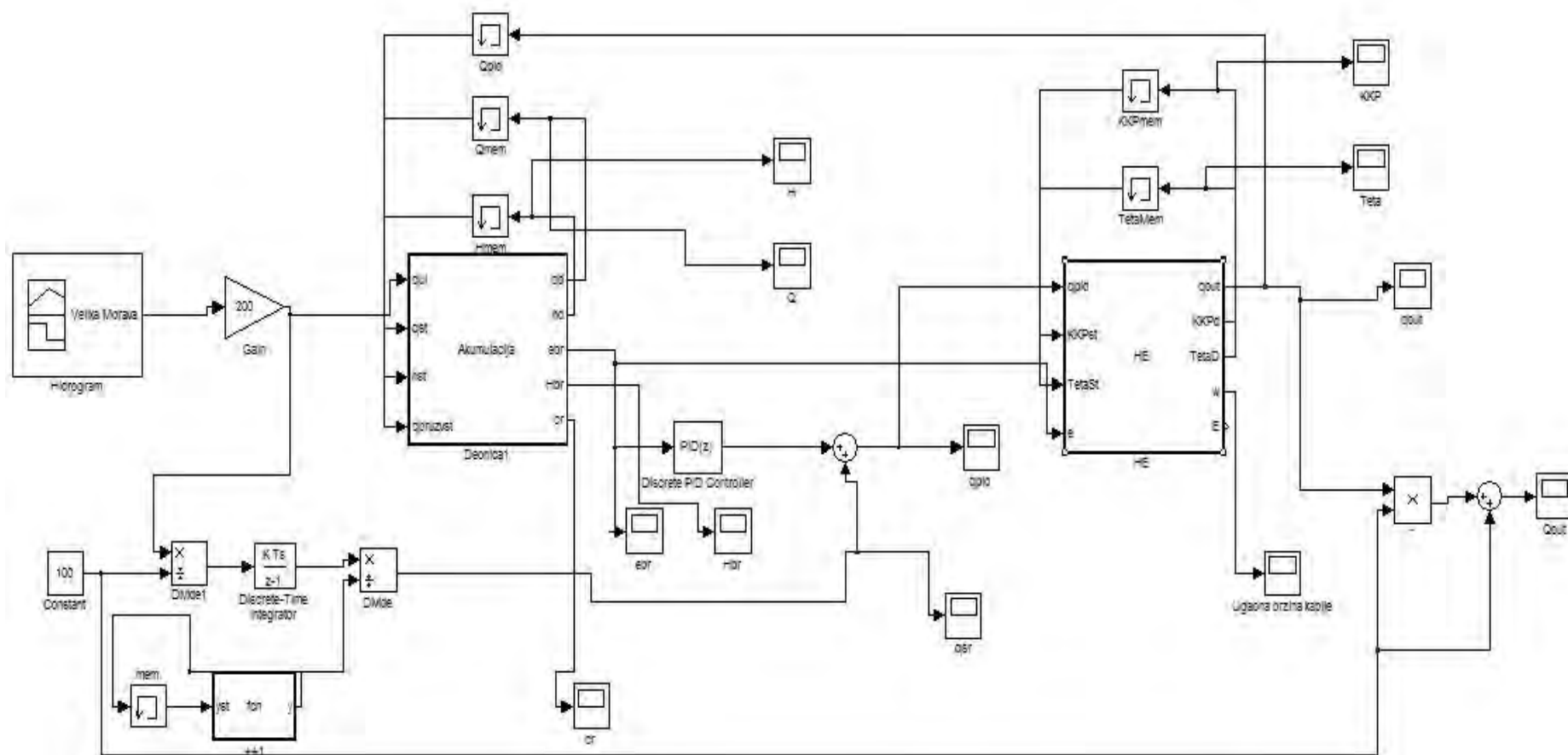
4.3 Модел акумулације са PID контролом и моделом хидроелектране

За разлику од претходног модела, где се уводи претпоставка да се маневрисање преливним објектима у потпуности може прилагодити командама добијеним са PID контроле, у другом моделу се уводи елемент Хидроелектрана, у ком претходна претпоставка не важи. Модел хидроелектране, тачније преливних објеката има ограничену вредност брзине маневрисања, што се свакако мора узети у обзир при моделирању, јер се на тај начин модел приближава реалности. Потребно је одредити угаону брзину ω којом би спуштање/подизање клапне у одреженој мери могло да се прилагоди командама PID контроле и да при томе испуњава одређена ограничења.

Последица увођења елемента који се односи на модел хидроелектране је да долази до веће амплитуде нивоа, у односу на референтни, а може доћи и до повећања времена успостављања референтног нивоа.



Слика 21. Алгоритам управљања покретним, преливним клапама



Слика 22. Модел акумулације и хидроелектране

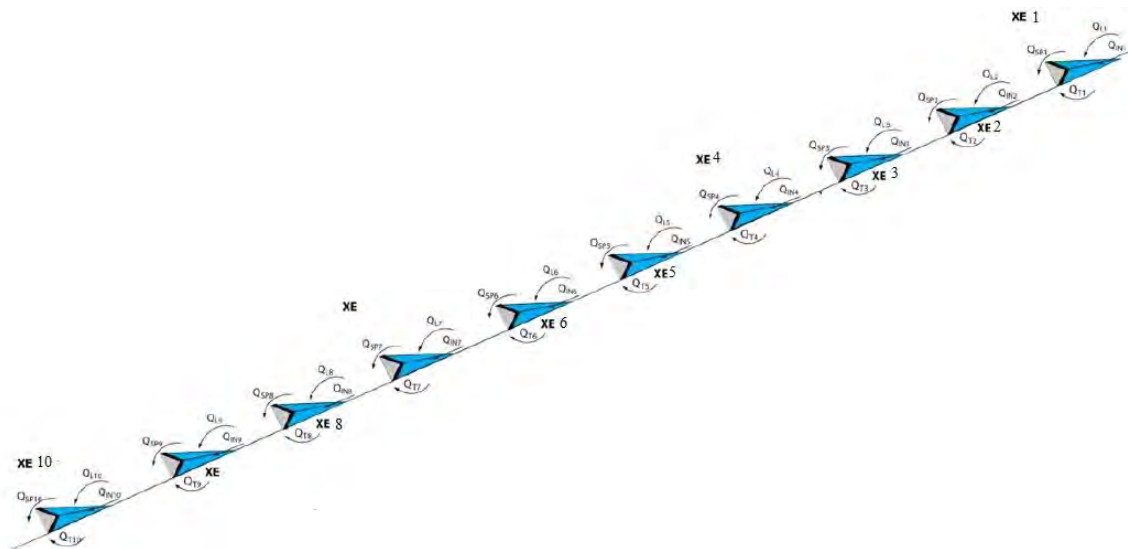
4.4 Модел каскадног ХЕС где се рад преливних објеката моделира PID контролом

Како би се анализирао режим рада каскадног ХЕС посматра се систем од десет хидроелектрана у низу у коме свакој од хидроелектрана одговара модел акумулације и PID контроле као модела рада преливних објеката. Циљ је видети како се понашају хидроелектране у низу при различитим сценаријима. Оптималне вредности контролних параметара PID контроле, за неки унапред дефинисани критеријум, разликују се у зависности поремећаја којим се систем побуђује на осциловање, у овом конкретном случају зависи од облика и вредности хидрограма. Пошто би се сваки од излазних хидрограма на хидроелектранам разликовао јер је и улаз у сваку од акумулација различит, постоји, врло вероватна, могућност да и оптималне вредности контролних варирају идући од хидроелектране до хидроелектране.

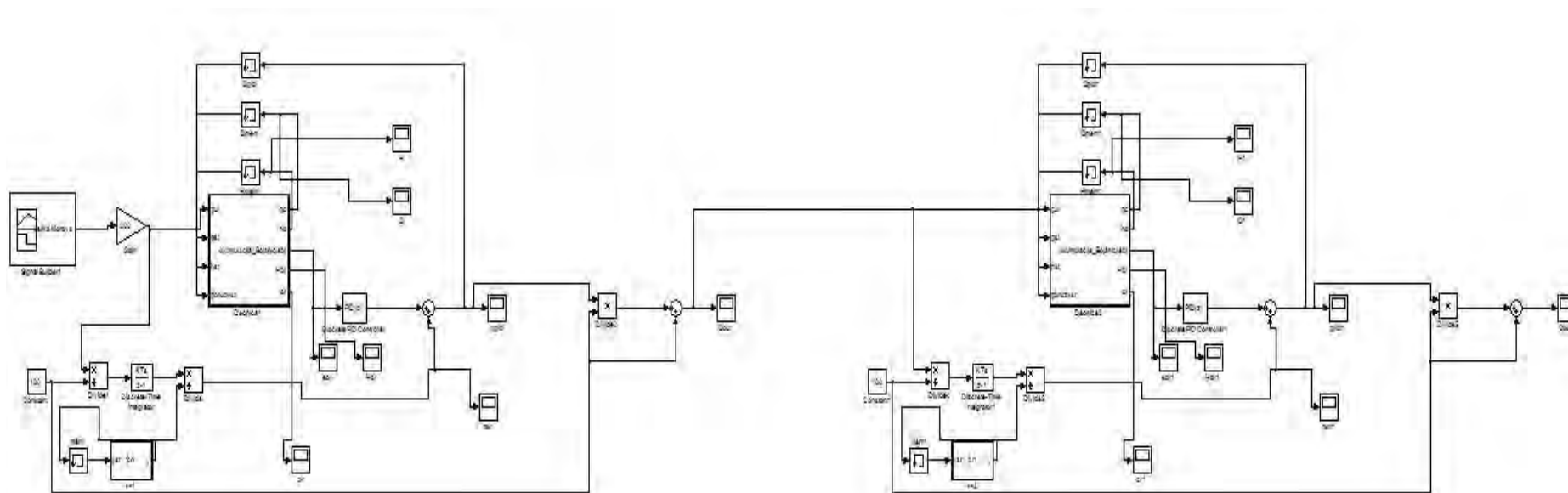
4.5 Модел каскадног ХЕС са моделом хидроелектране

Модел каскадног хидроенергетског система са PID контролом као моделом рада преливних објеката, као што је већ наглашено, не узима у обзир ограничене маневарске способности преливних уређаја, у овом случају ротирајућих преливних клапни. Како би се и то узело у обзир уводи се модел хидроелектране, за све хидроелектране у каскади, са имплементираним алгоритмом управљања приказаним на слици 21. Поред тога што постоји могућност значајне разлике у вредностима PID контроле за сваку од хидроелектрана, врло је вероватно да маневри на једној од преливних клапни не одговарају маневрима на некој низводној, тачније брзине спуштања/подизања могу се разликовати за сваку од преливних клапни.

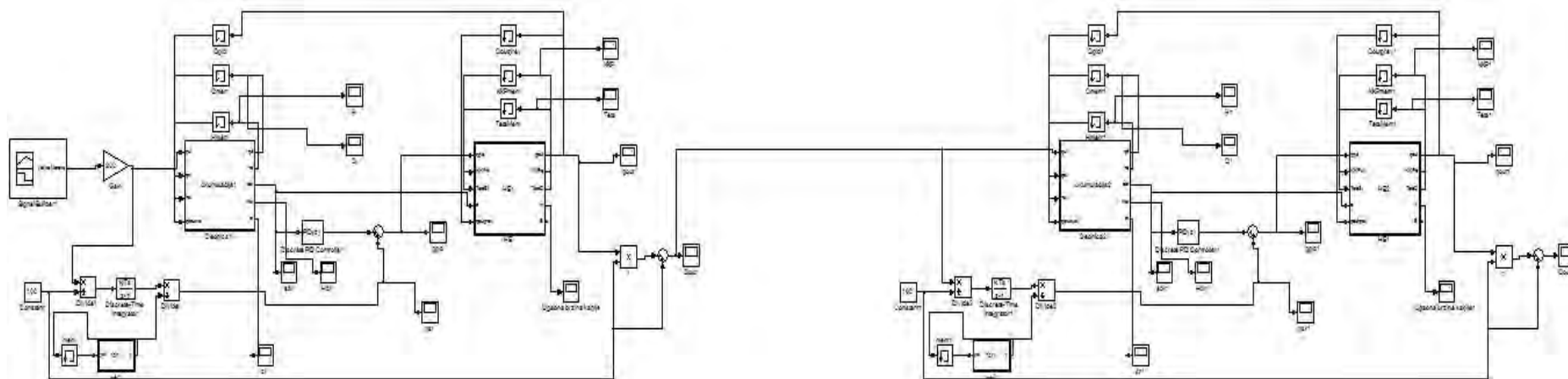
Од интереса је одредити брзине спуштања/подизања клапни које би на најбољи начин могле да задовоље команде са PID контроле, водећи притом рачуна на ограничене механичке карактеристике преливних уређаја и других ограничења.



Слика 23. Схематски приказ каскадно ХЕС састављеног од 10 ХЕ



Слика 24. Модел каскадног ХЕС са PID контролом као моделом хидроелектрана (напомена: ради прегледности приказане су само две од укупно десет ХЕ, осталих 8 изгледа идентично као и друга)



Слика 25. Модел каскадног ХЕС са моделом хидроелектрана (напомена: ради прегледности приказане су само две од укупно десет ХЕ, осталих 8 изгледа идентично као и друга)

4.6 Утицај мерних грешака на резултате PID контроле

Претходно је напоменуто да PID контрола мери грешку у току времена и у зависности од тога која од комбинација контроле се користи прилагођава излазну величину (control variable) у циљу смањења одступања. Пошто су сама мерења подложна различитим грешкама, потребно је испитати и њихов утицај. Грешке у мерењу нивоа могу да се поделе на две групе: грешке настале услед погрешне калибрације или услед лошег уређаја који има постепено клизање калибрације. Како би се испитао могући утицај грешака мерења нивоа на улазни сигнал PID контроле генерисан је вештачки шум у облику синусоиде са фреквенцијом од $f_z=0.1$ Hz и амплитудом од 0.1 m.

5 Резултати

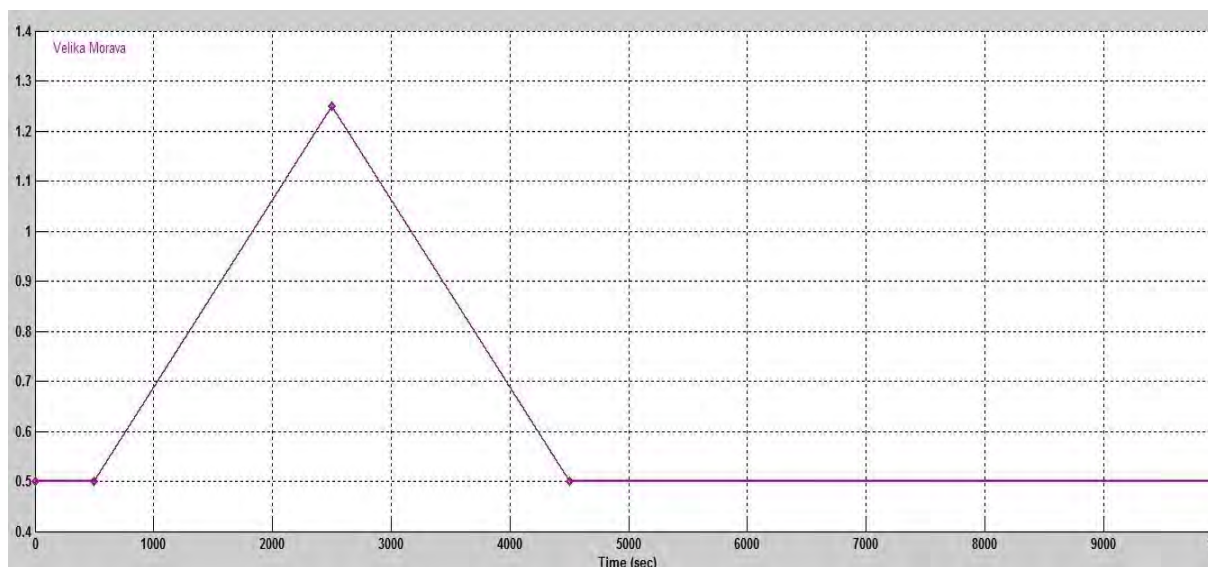
5.1 Резултати за модел приказан под 4.2

Модел у коме се се неустаљено течење у акумулацији представља моделом дифузионог таласа, а рад преливних објеката PID контролом служи за, пре свега, сагледавање утицаја вредности контролних параметара PID контроле на хидрауличке параметре. У ту сврху тестирани су утицаји следећих комбинација вредности пропорционалних, интегративних и деривативних коефицијената:

Табела 2. Варијанте вредности контролних параметара

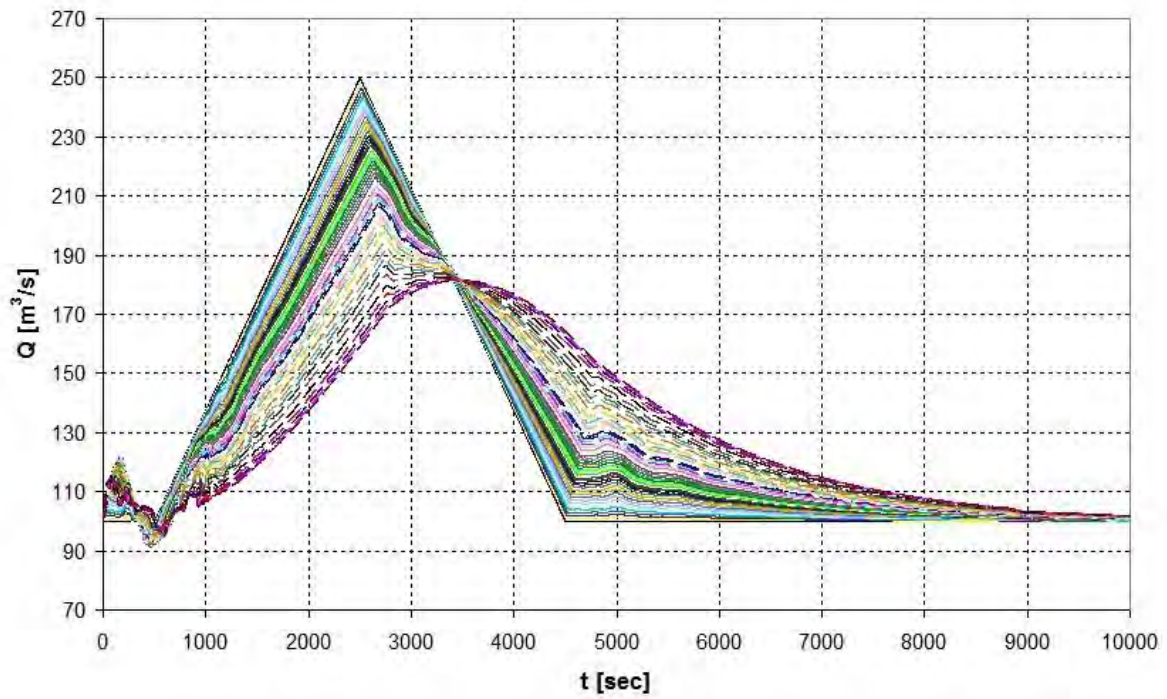
Варијанта	K_p	K_i	K_d	q_{ff}
1	5	0	0	ne
2	10	0	0	ne
3	100	0	0	ne
4	200	0	0	ne
5	200	0.01	0	ne
6	200	0.1	0	ne
7	200	1	0	ne
8	200	10	0	ne
9	200	10	0	da
10	200	10	0.01	ne

Иако је претходно поменуто да се за модел рада преливних објеката користи ПИ контрола унапређена информацијом са узводне хидроелектране (*feed forward*), поред тога испитано је и пар случајева у којима не фигурише информација са узводне акумулације и када се користи и деривативна компонента PID контроле. Улазни хидрограм за прву акумулацију је задат у јединичном, троугаоном облику, при чему су вредности протока добијене множењем са 200 ($gain=200$).



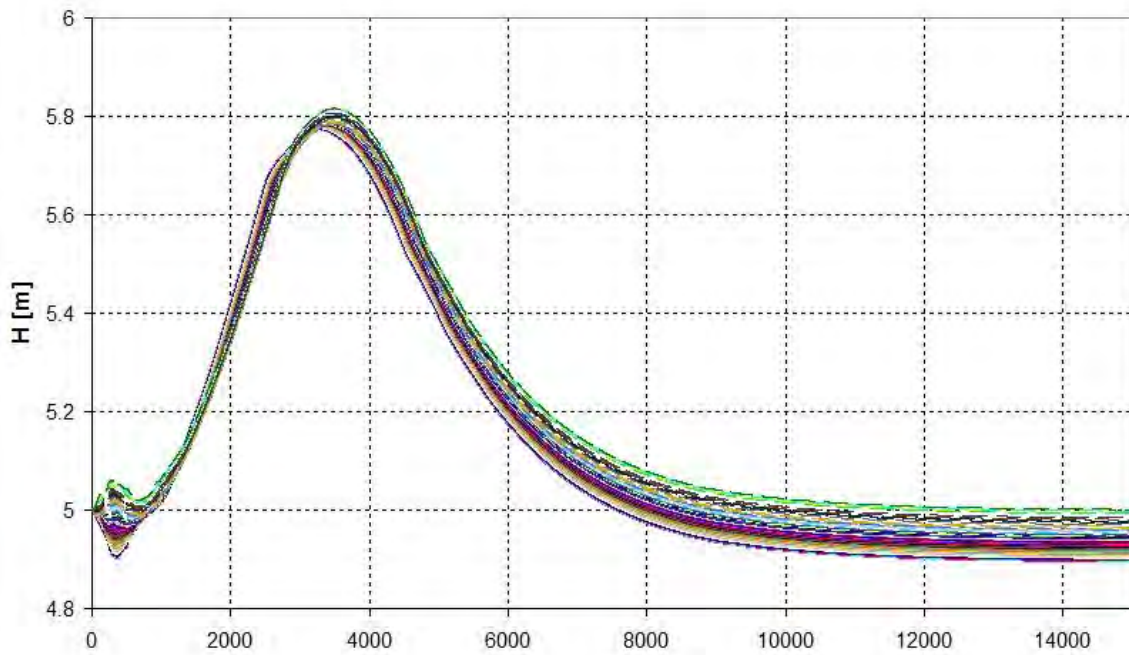
Слика 26. Улазни хидрограм у најузводнију акумулацију

Hidrogrami u racunskim presecima

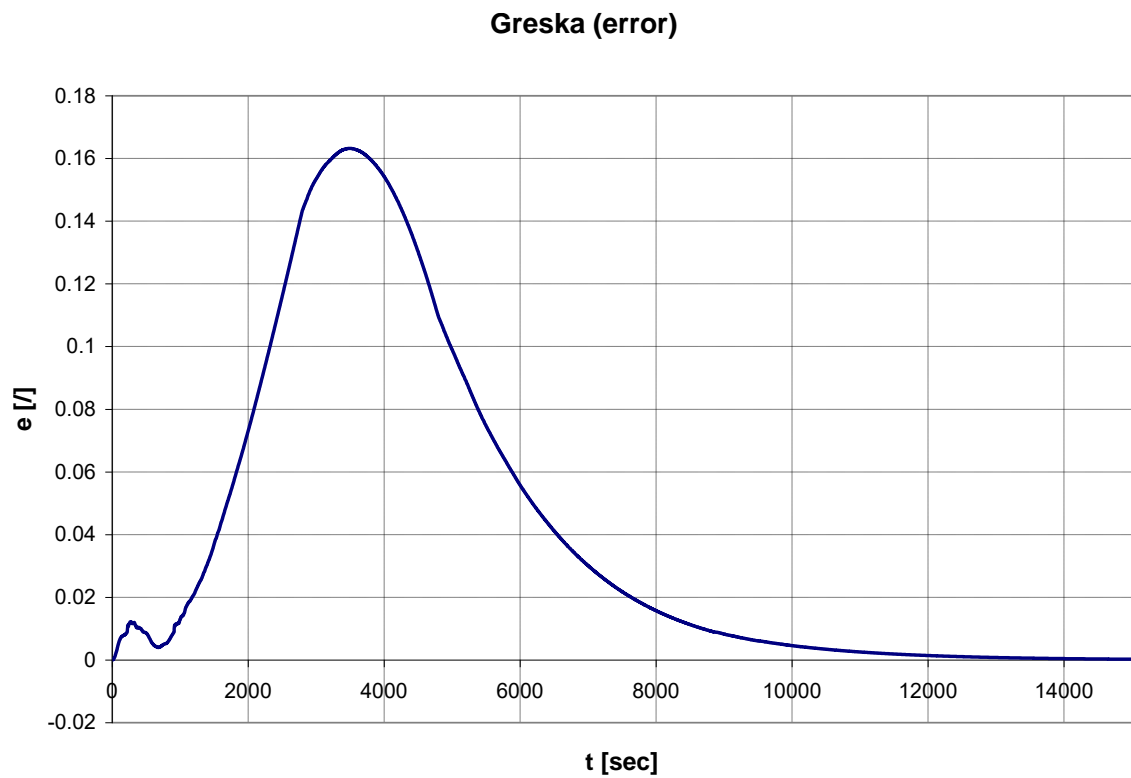


Слика 27. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметра 1

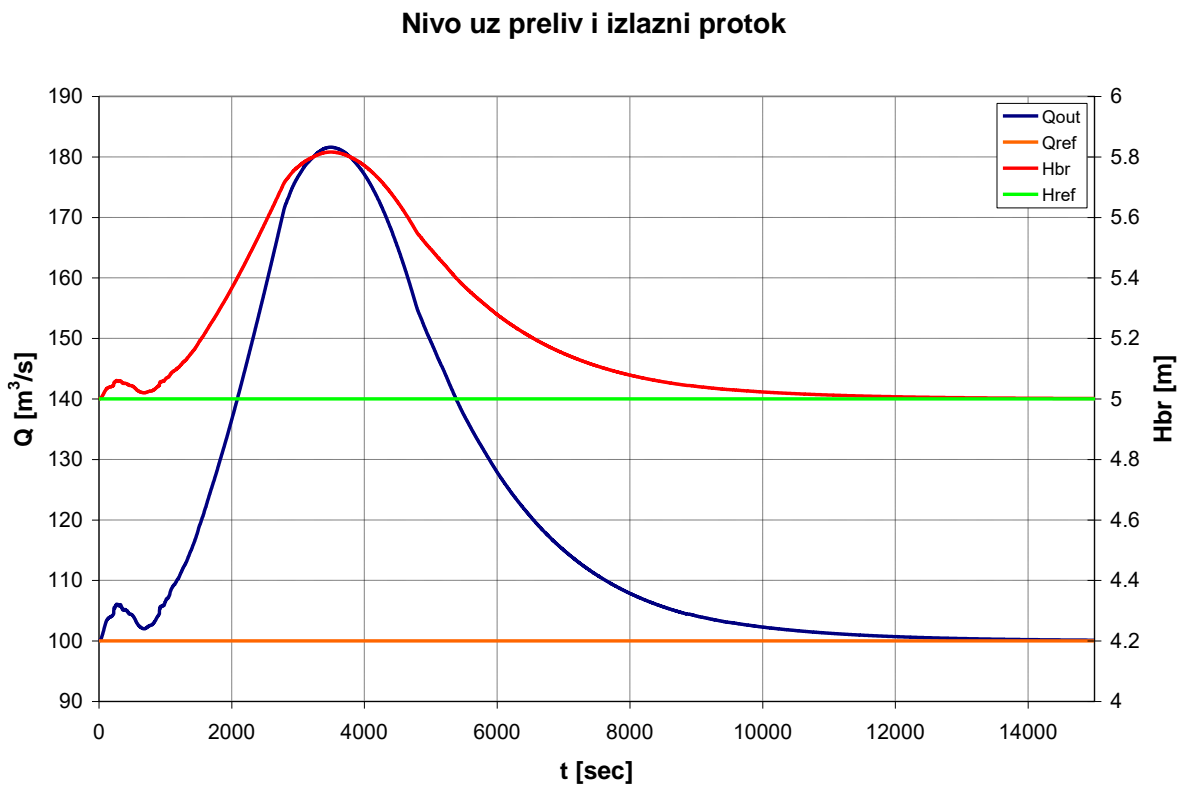
Nivogrami u racunskim presecima



Слика 28. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметра 1

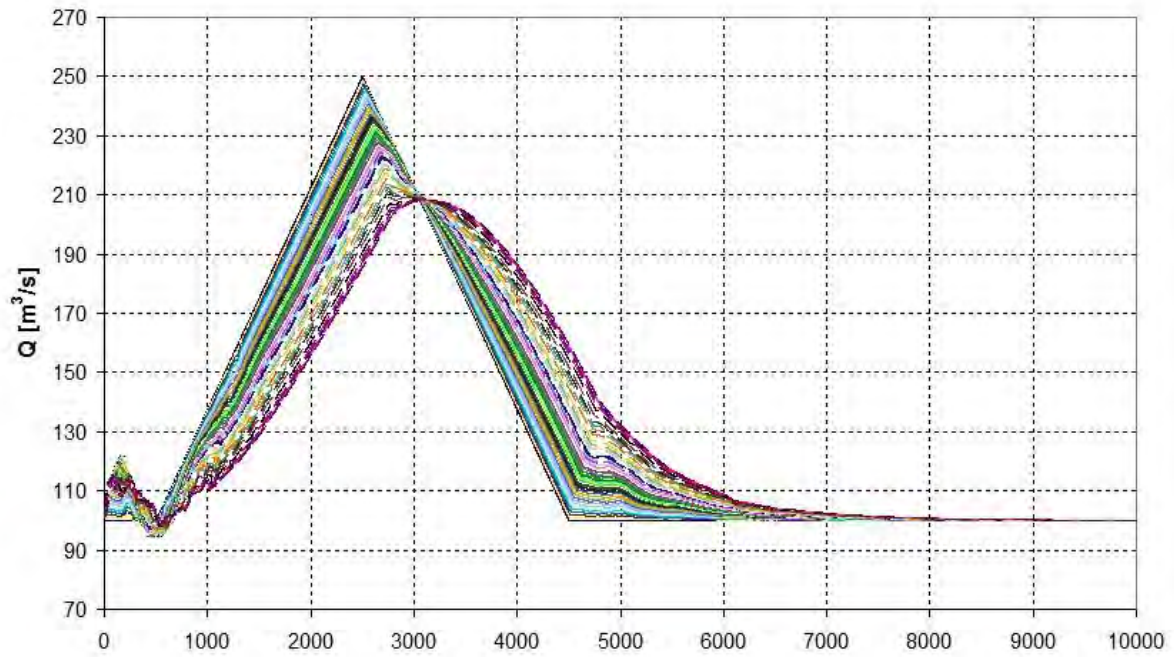


Слика 29. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 1



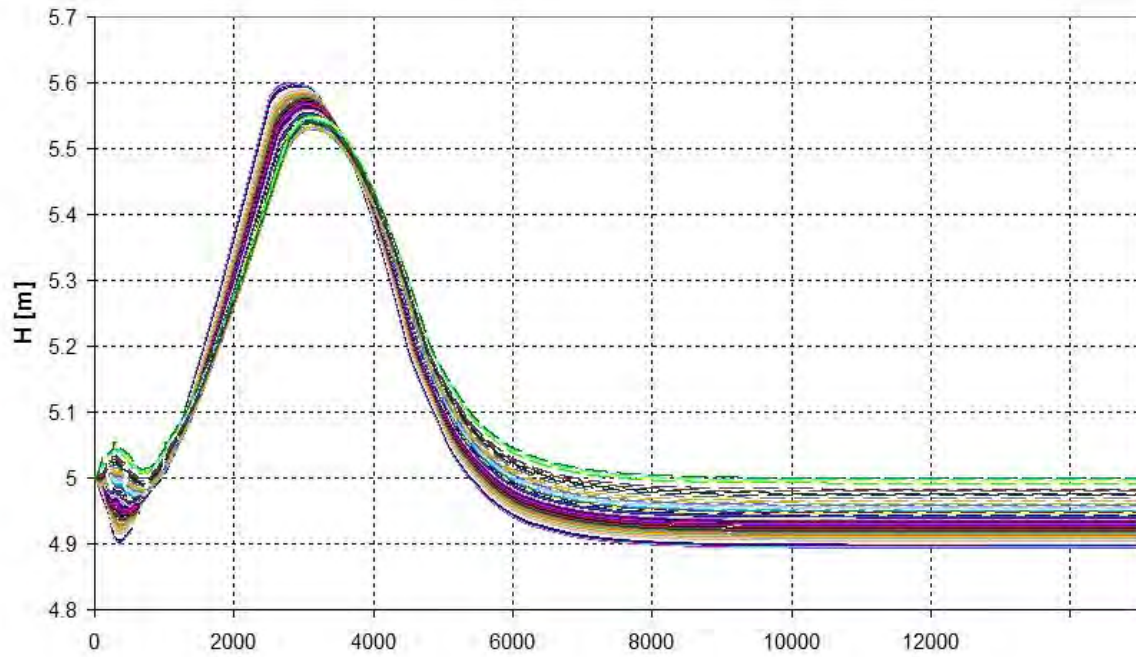
Слика 30. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту параметара 1

Hidrogrami u racunskim presecima



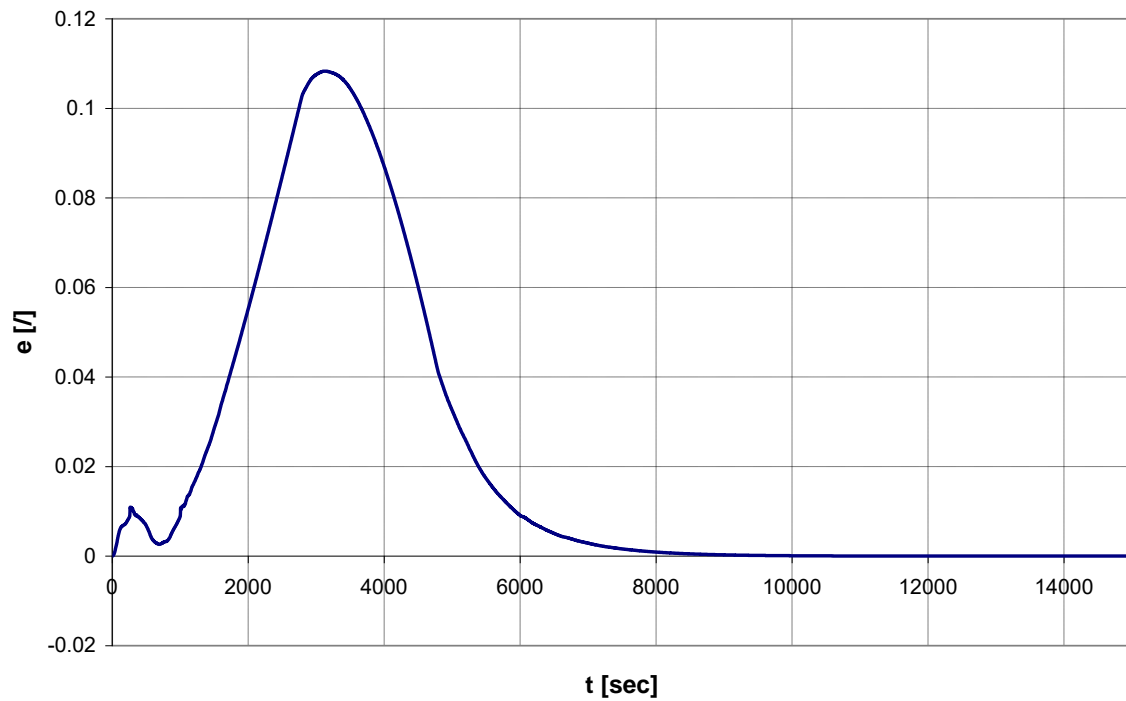
Слика 31. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 2

Nivogrami u racunskim presecima



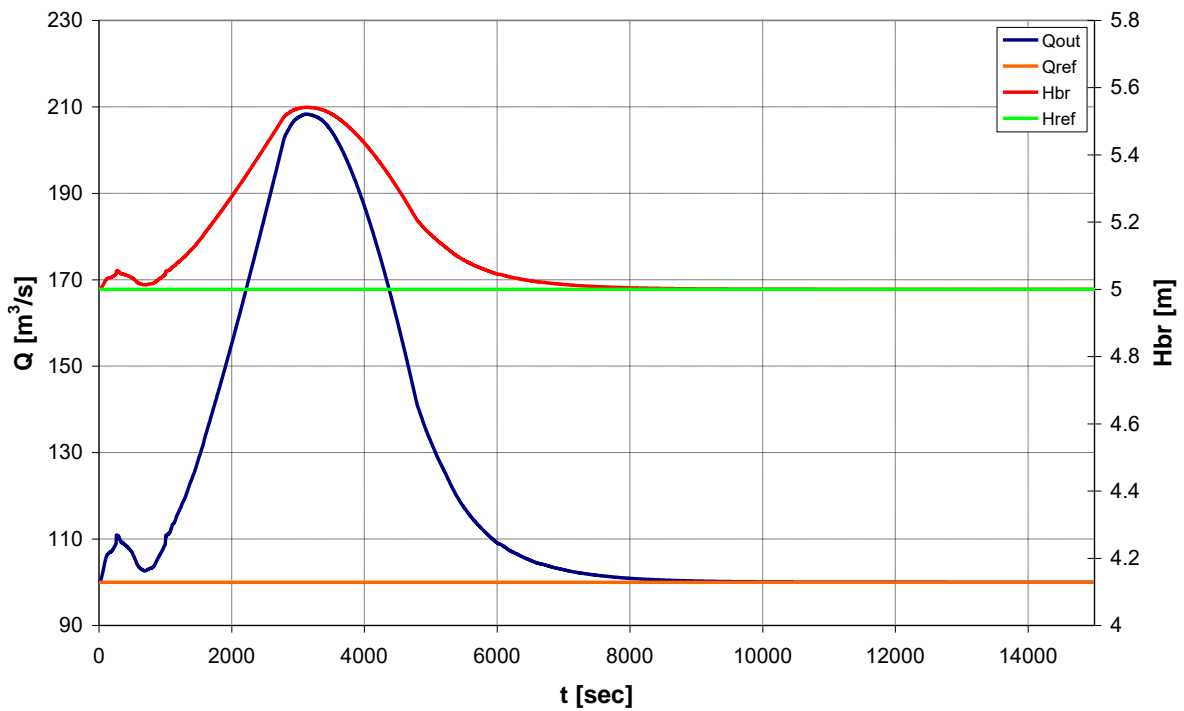
Слика 32. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 2

Greska (error)



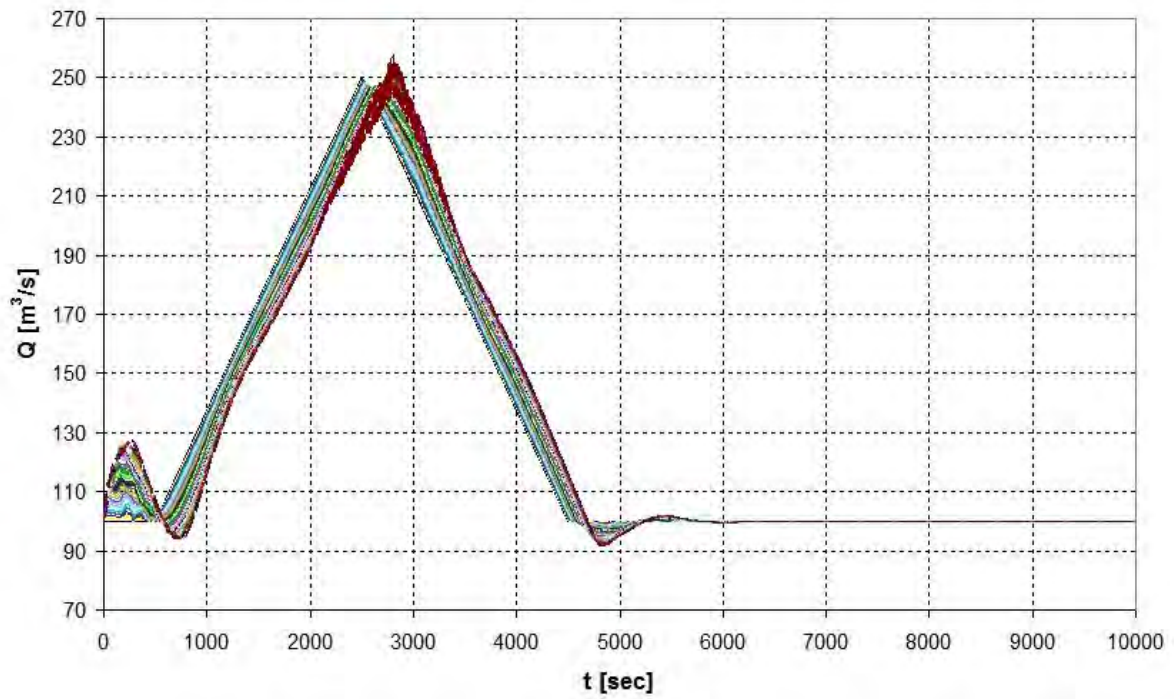
Слика 33. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 2

Nivo uz preliv i izlazni protok



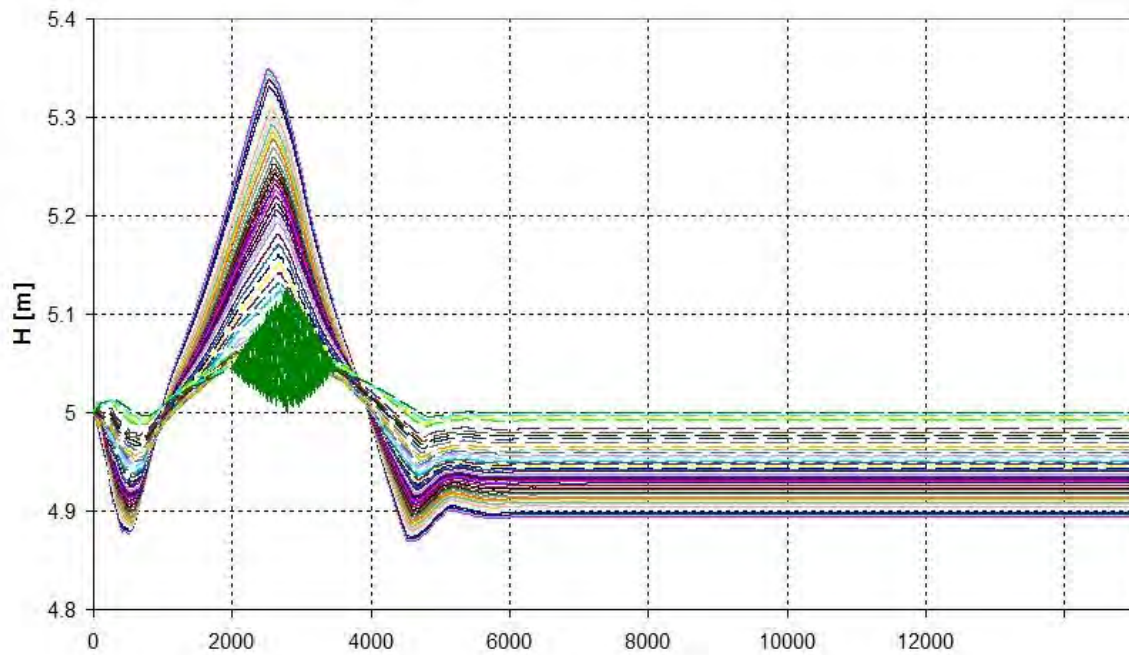
Слика 34. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 2

Hidrogrami u racunskim presecima



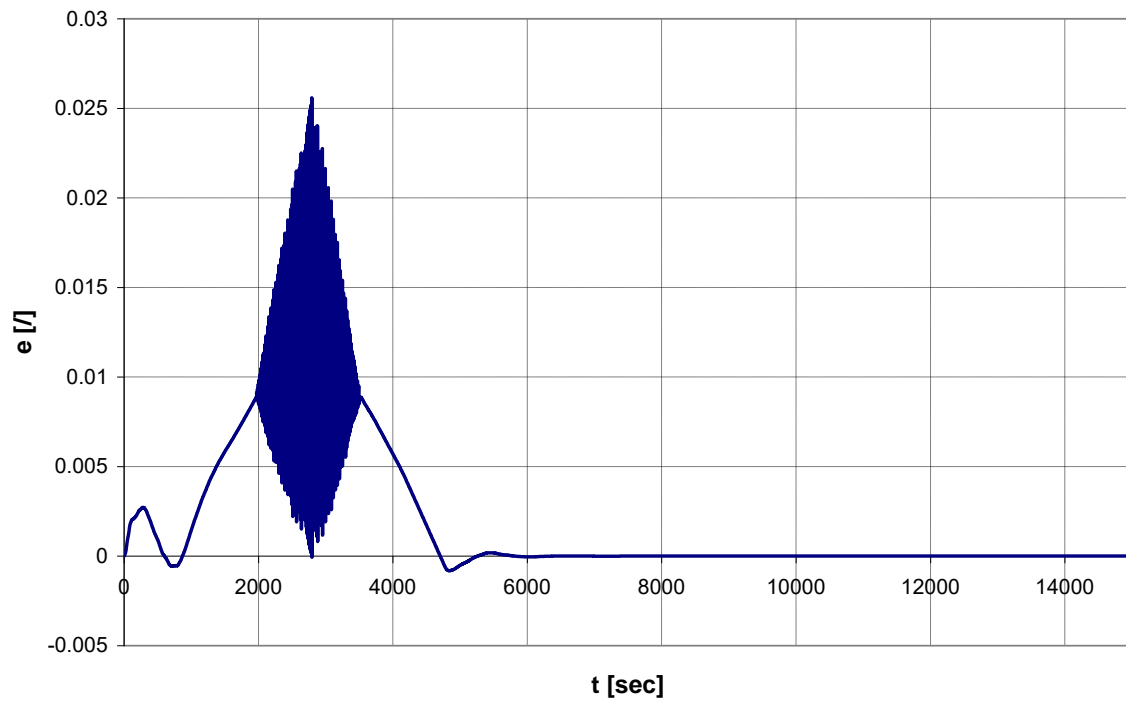
Слика 35. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 3

Nivogrami u racunskim presecima



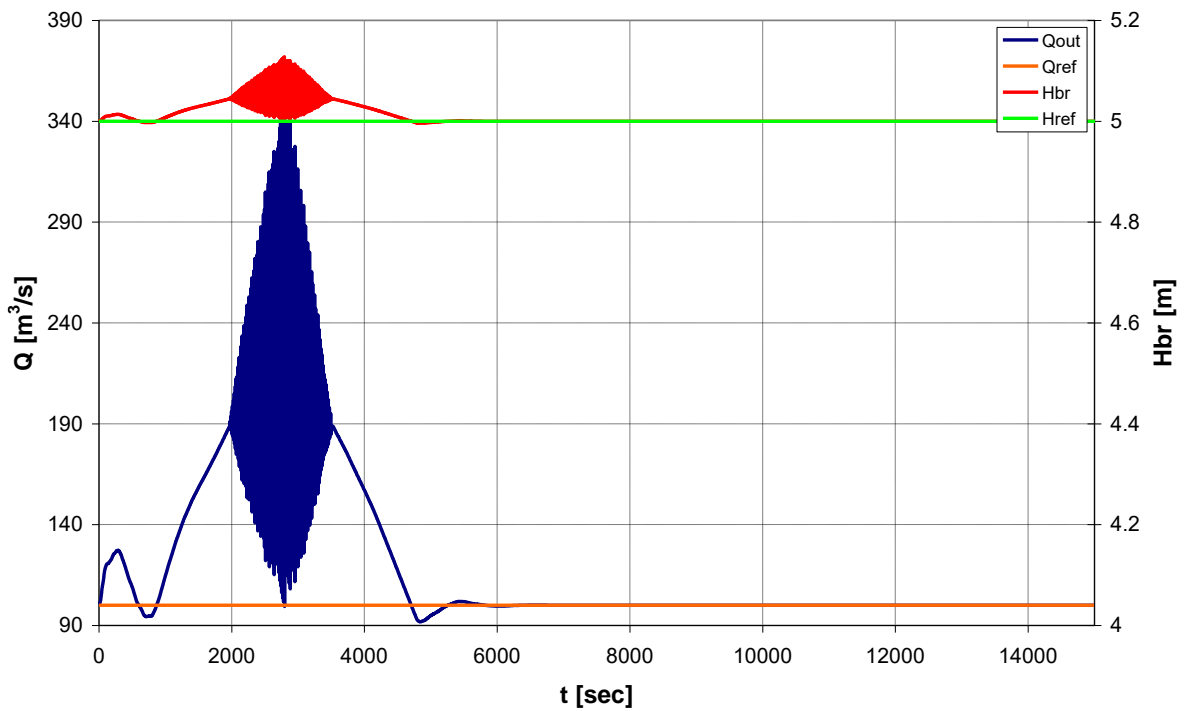
Слика 36. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 3

Greska (error)



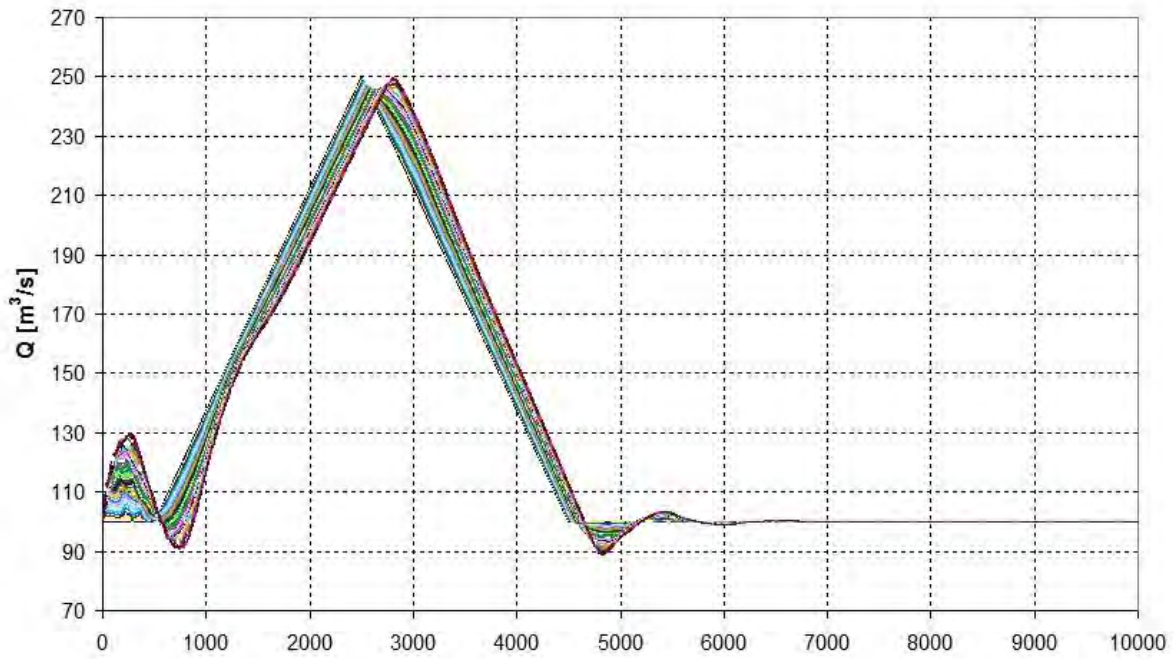
Слика 37. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 3

Nivo uz preliv i izlazni protok



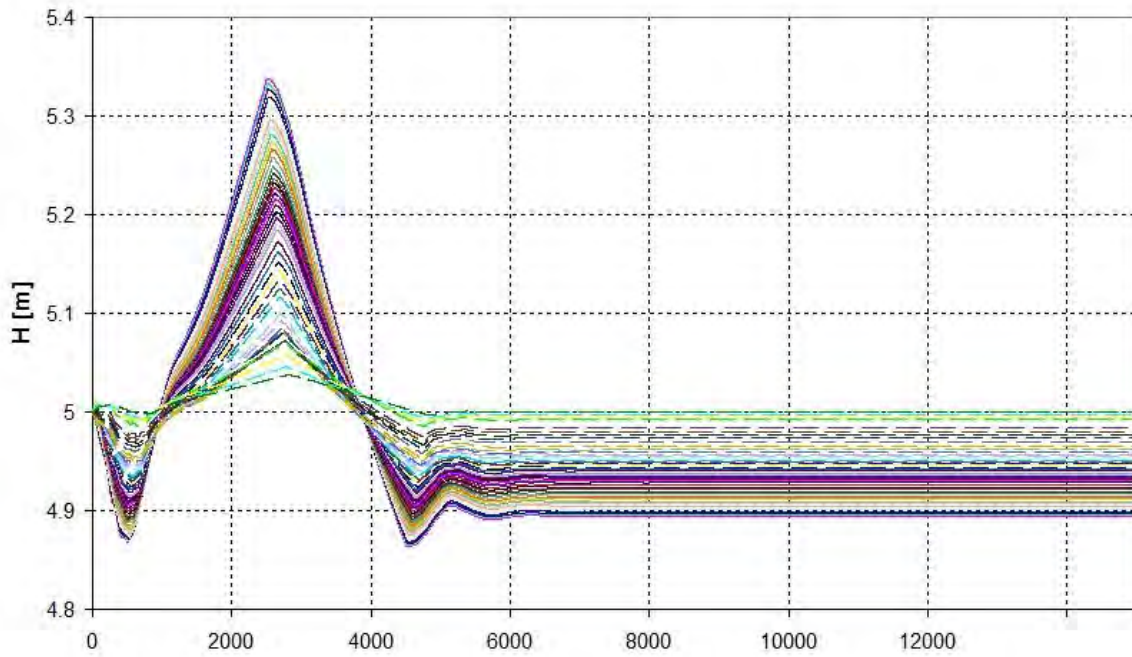
Слика 38. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 3

Hidrogrami u racunskim presecima



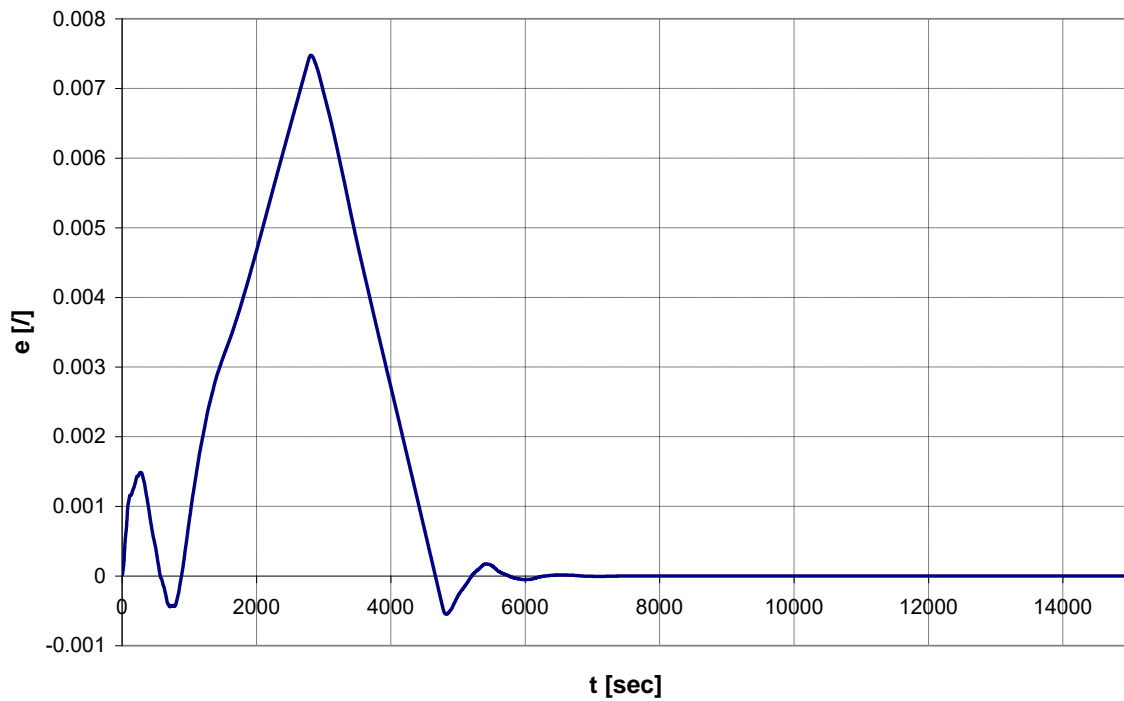
Слика 39. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 4

Nivogrami u racunskim presecima



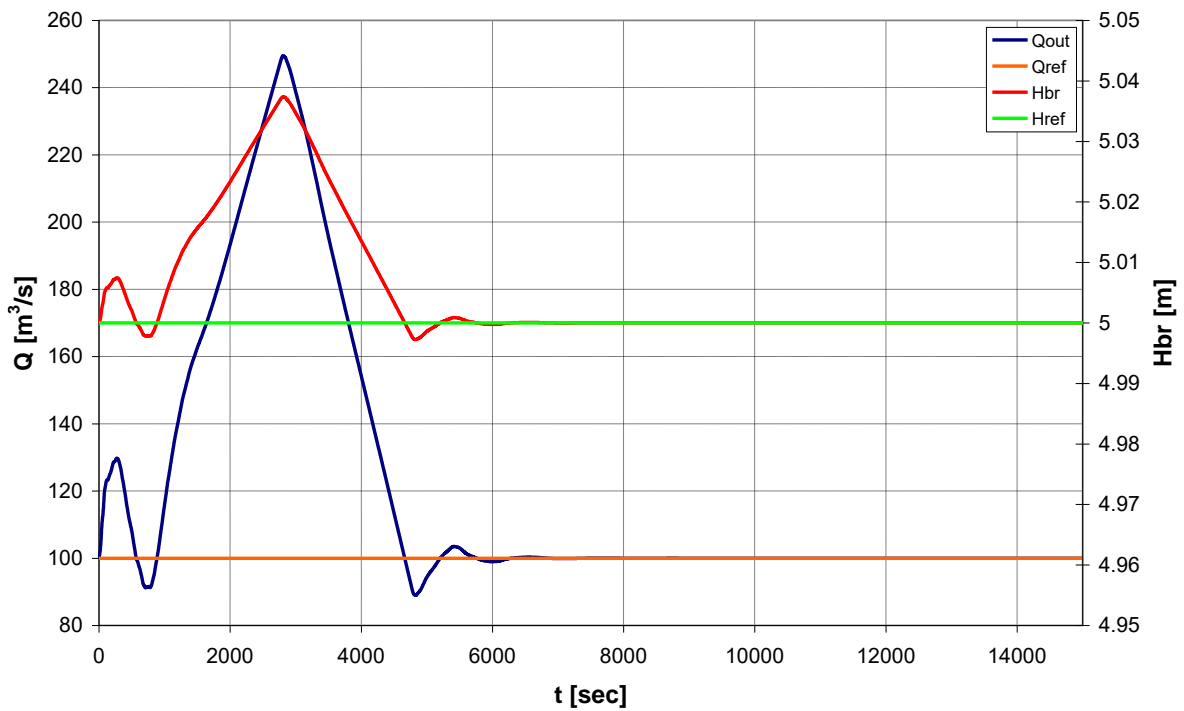
Слика 40. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 4

Greska (error)



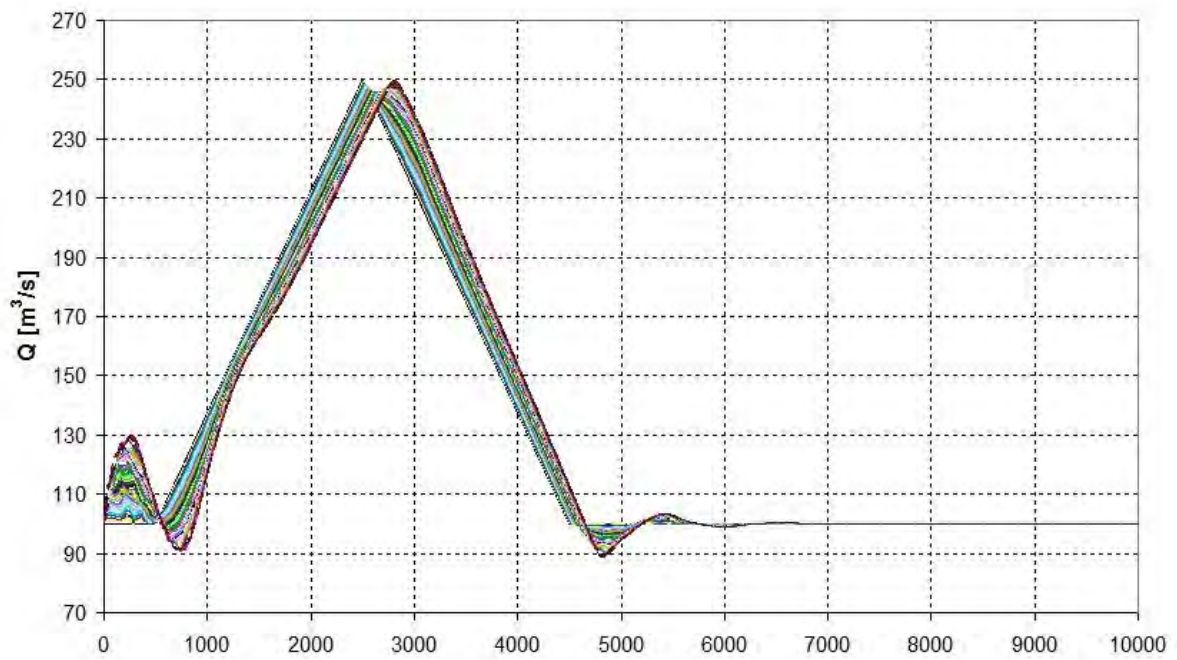
Слика 41. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 4

Nivo uz preliv i izlazni protok



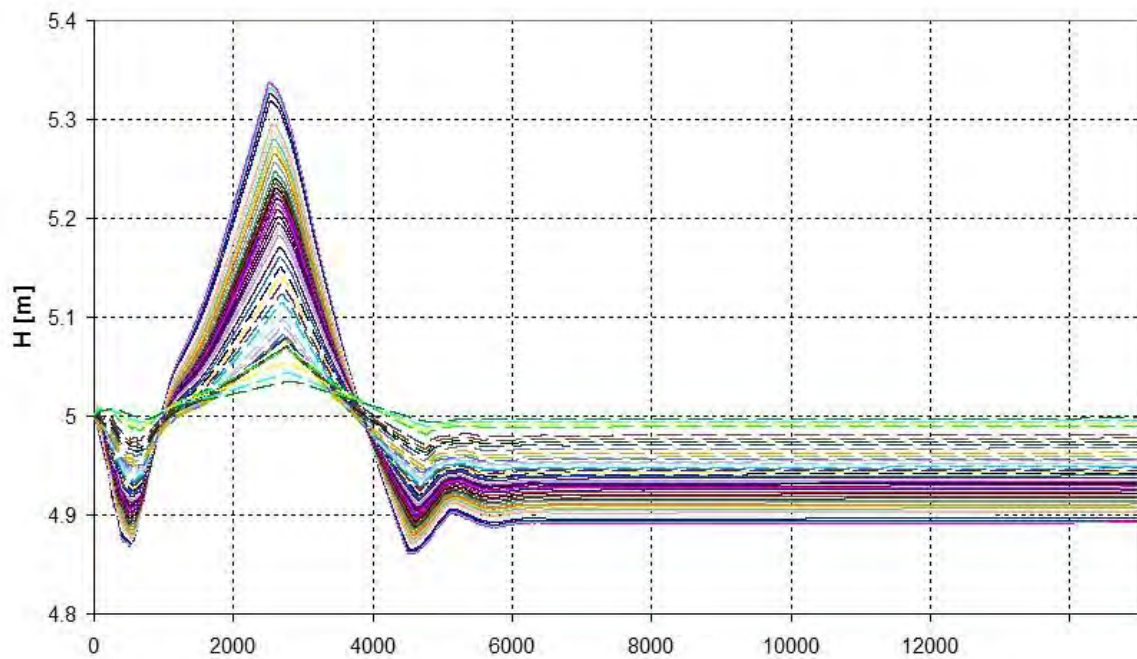
Слика 42. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 4

Hidrogrami u racunskim presecima



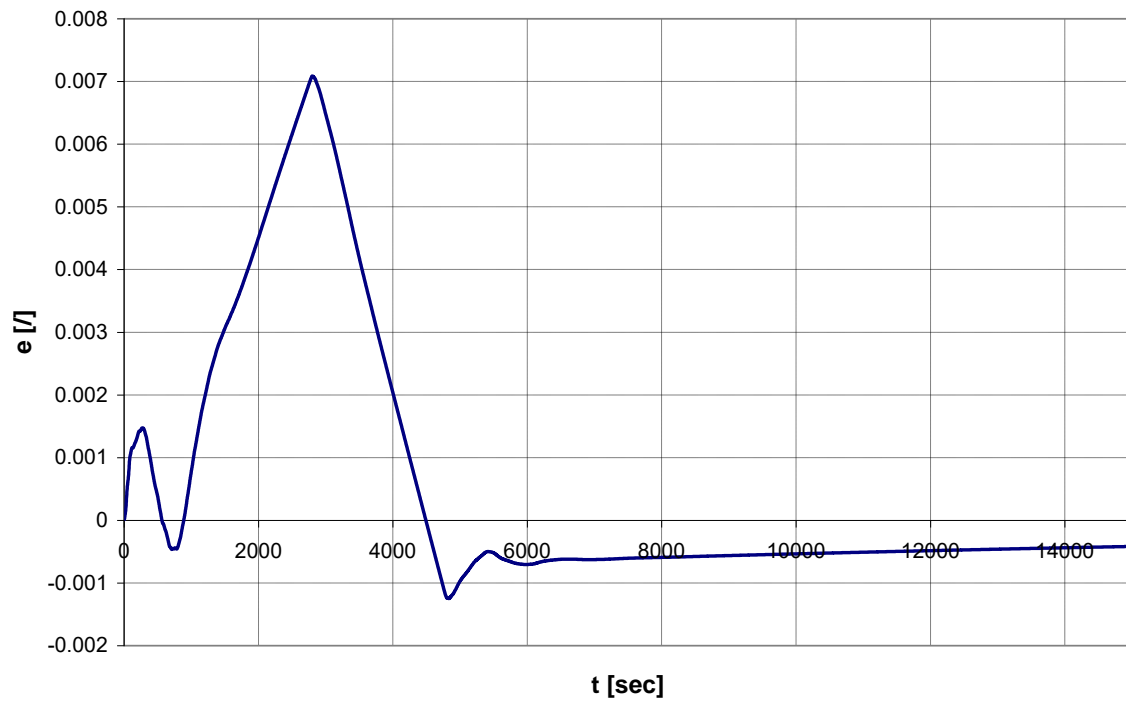
Слика 43. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 5

Nivogrami u racunskim presecima



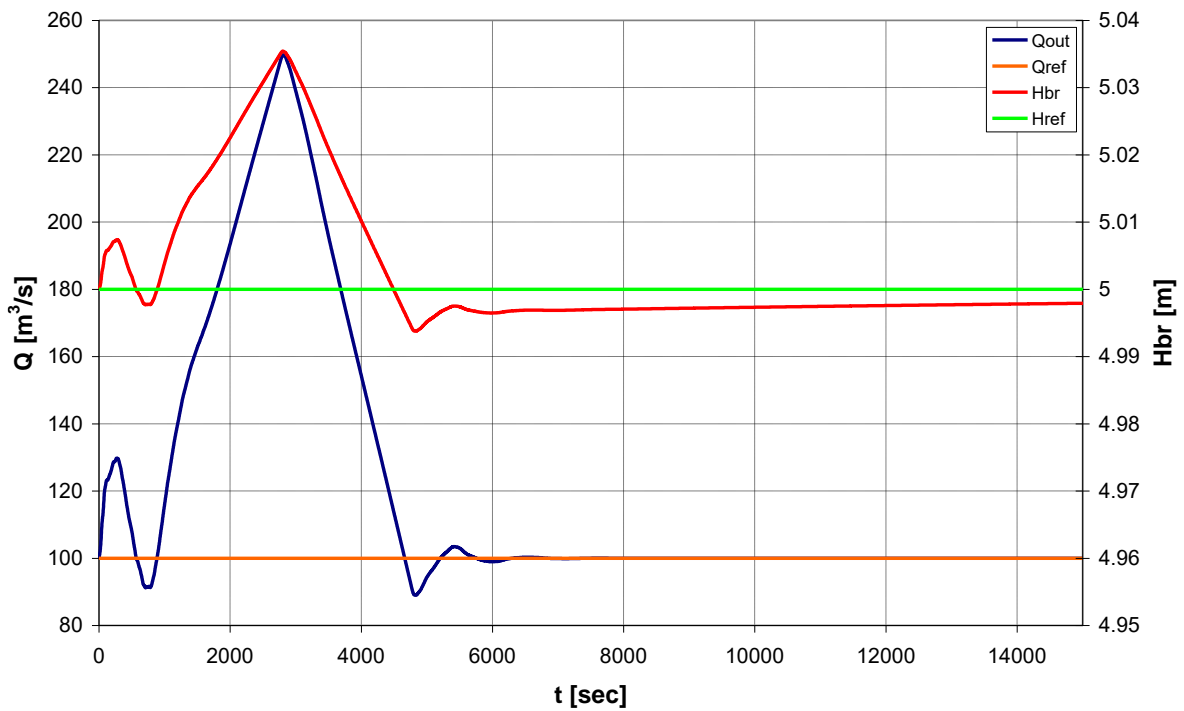
Слика 44. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 5

Greska (error)



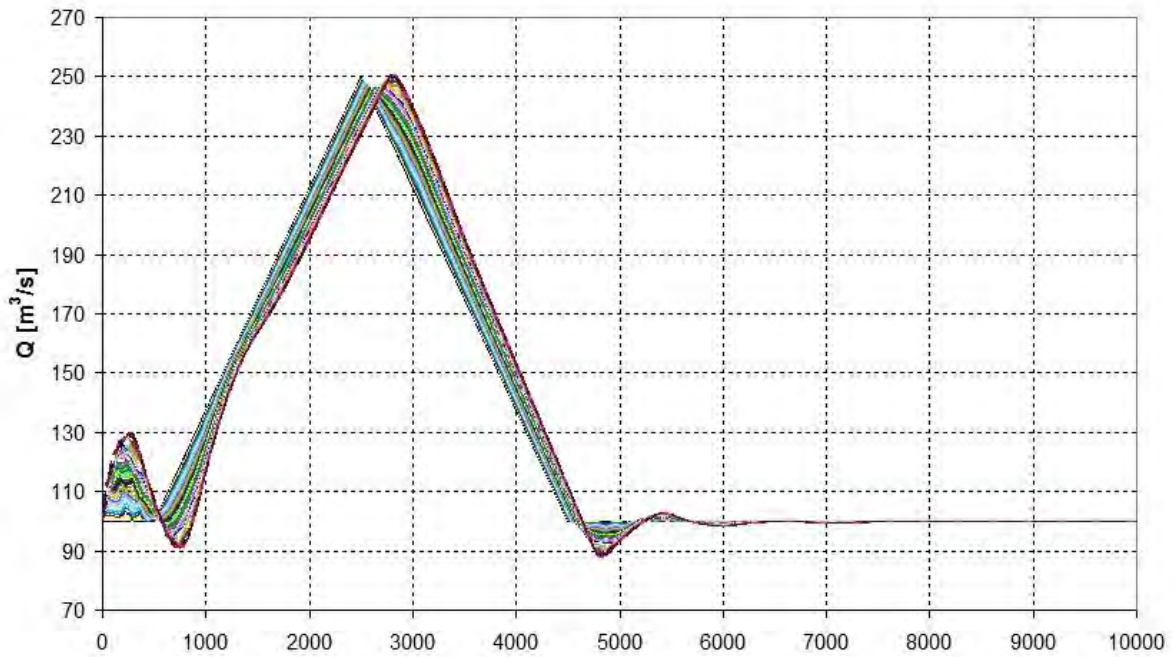
Слика 45. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 5

Nivo uz preliv i izlazni protok



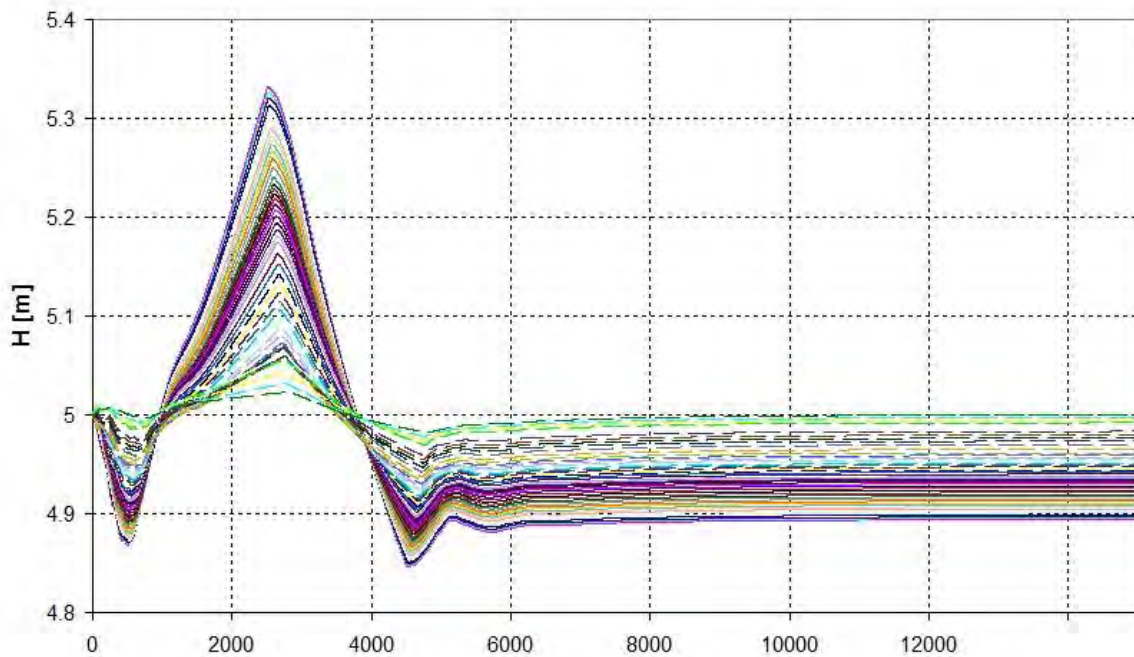
Слика 46. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 5

Hidrogrami u racunskim presecima



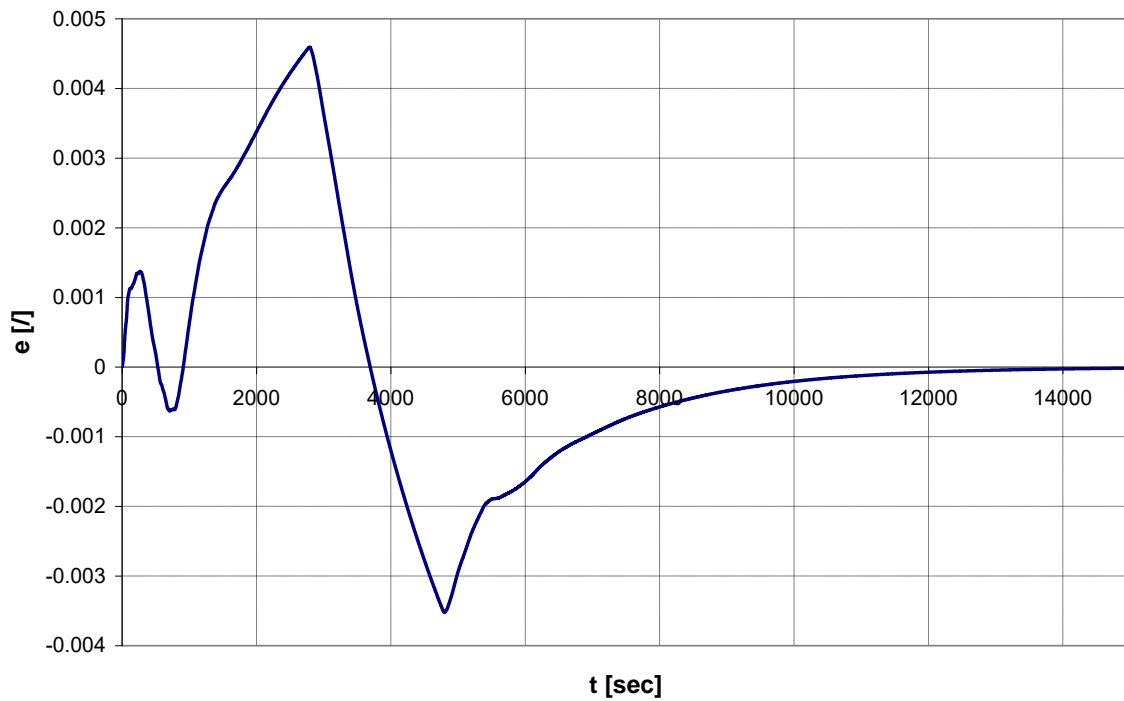
Слика 47. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара б

Nivogrami u racunskim presecima



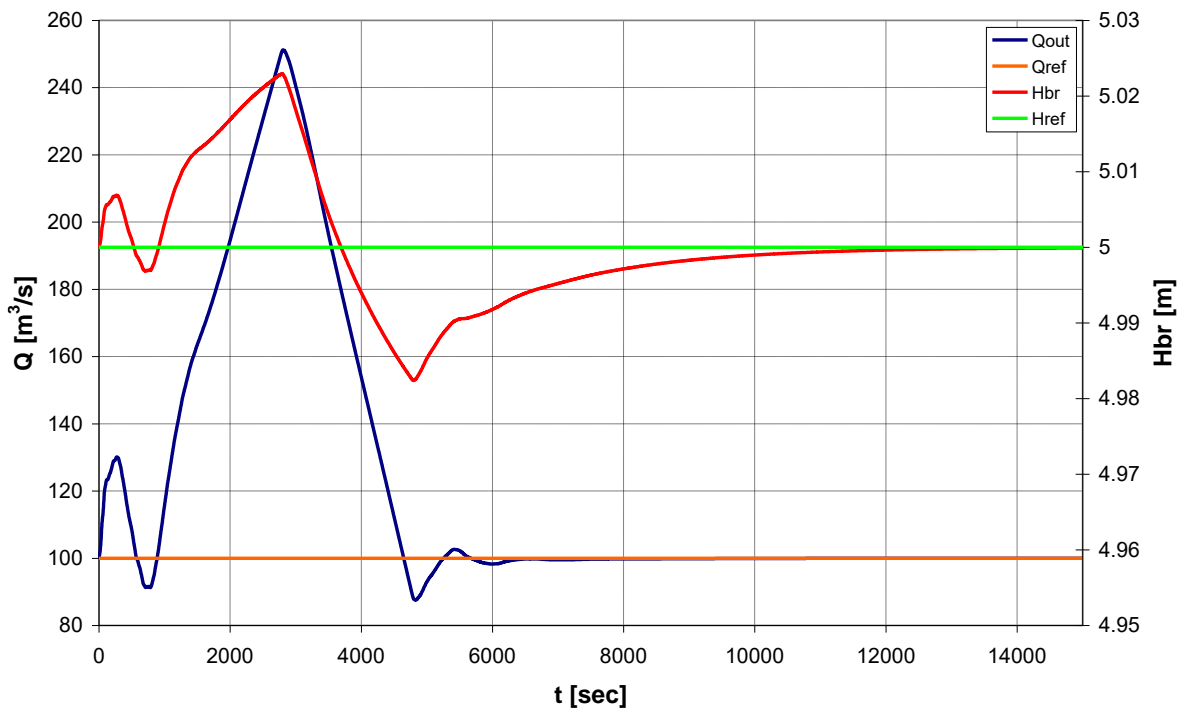
Слика 48. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара б

Greska (error)



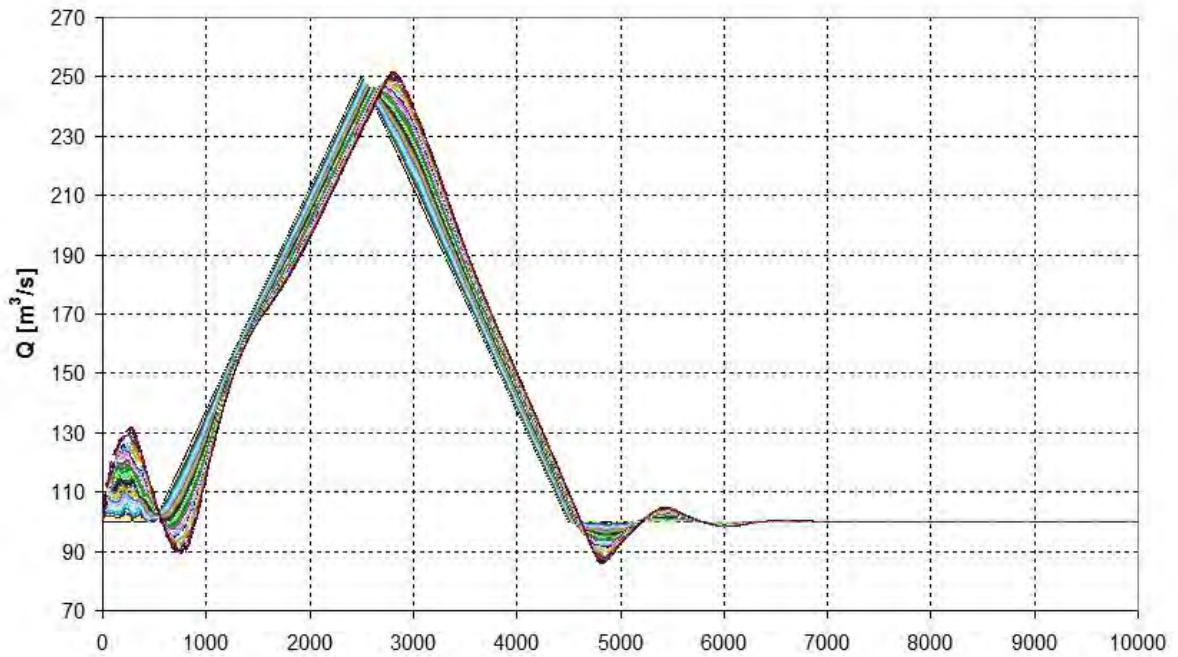
Слика 49. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара б

Nivo uz preliv i izlazni protok



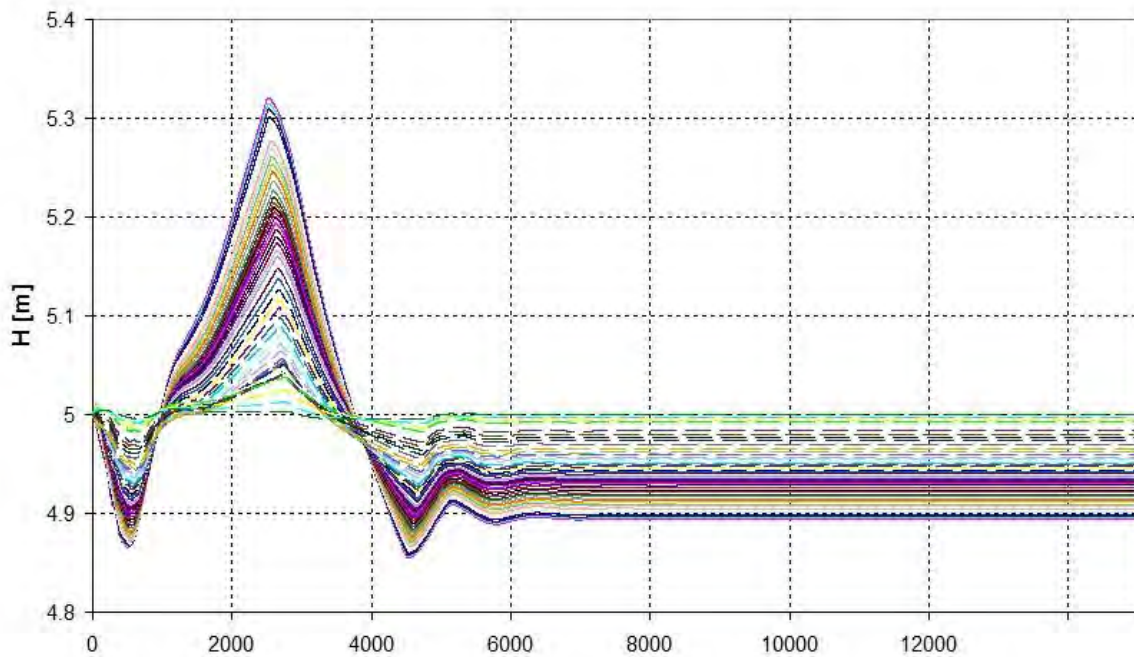
Слика 50. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара б

Hidrogrami u racunskim presecima



Слика 51. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 7

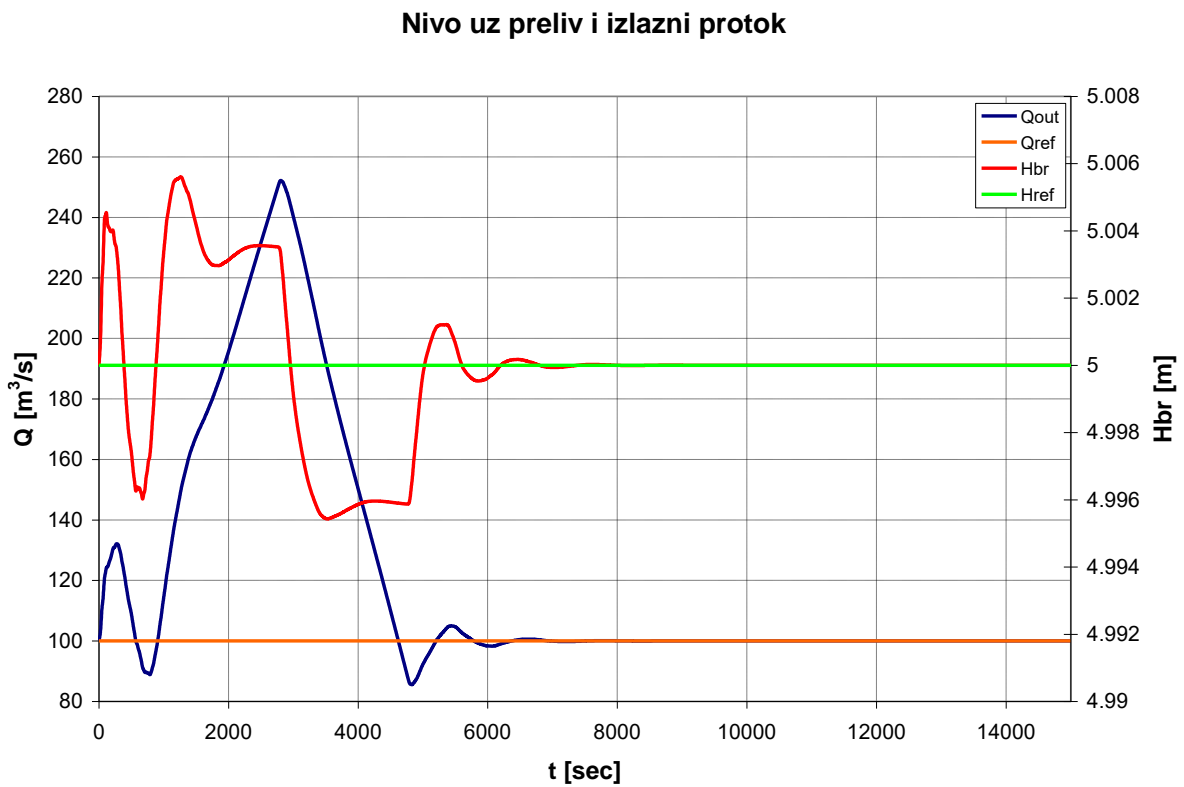
Nivogrami u racunskim presecima



Слика 52. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 7

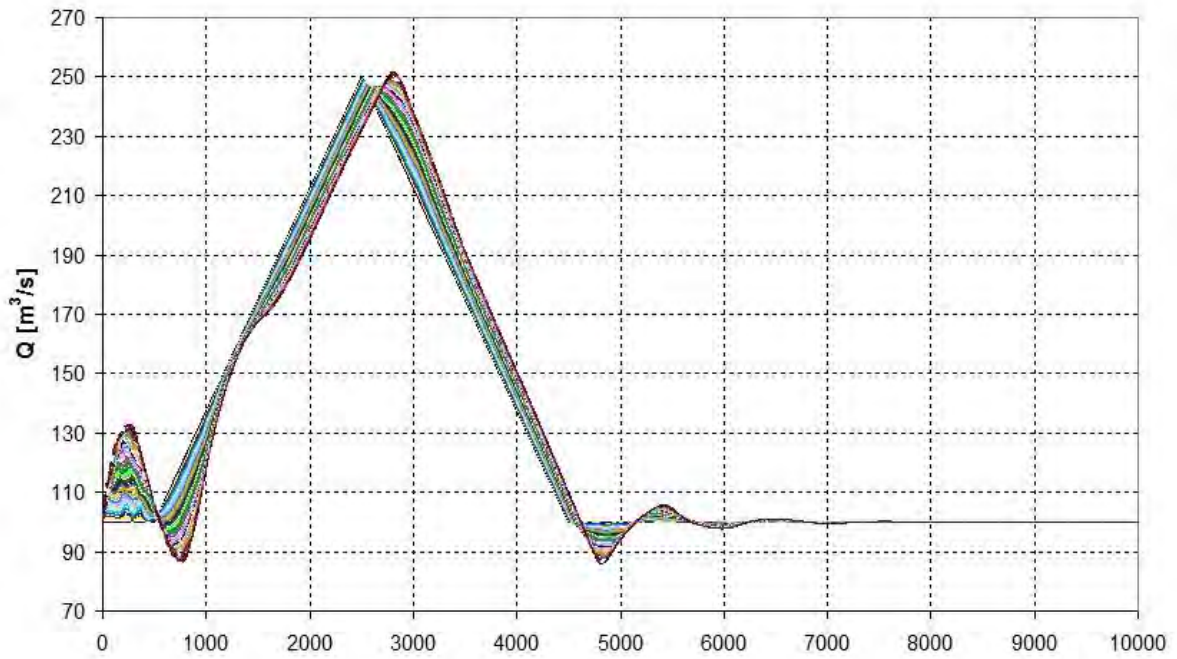


Слика 53. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 7



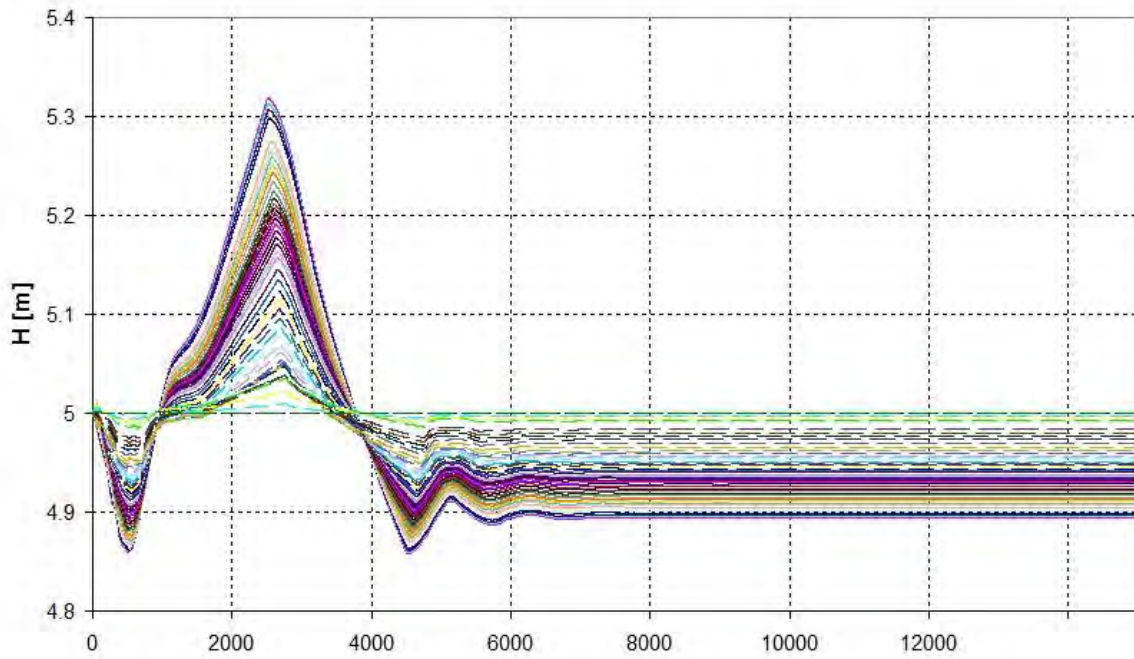
Слика 54. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 7

Hidrogrami u racunskim presecima



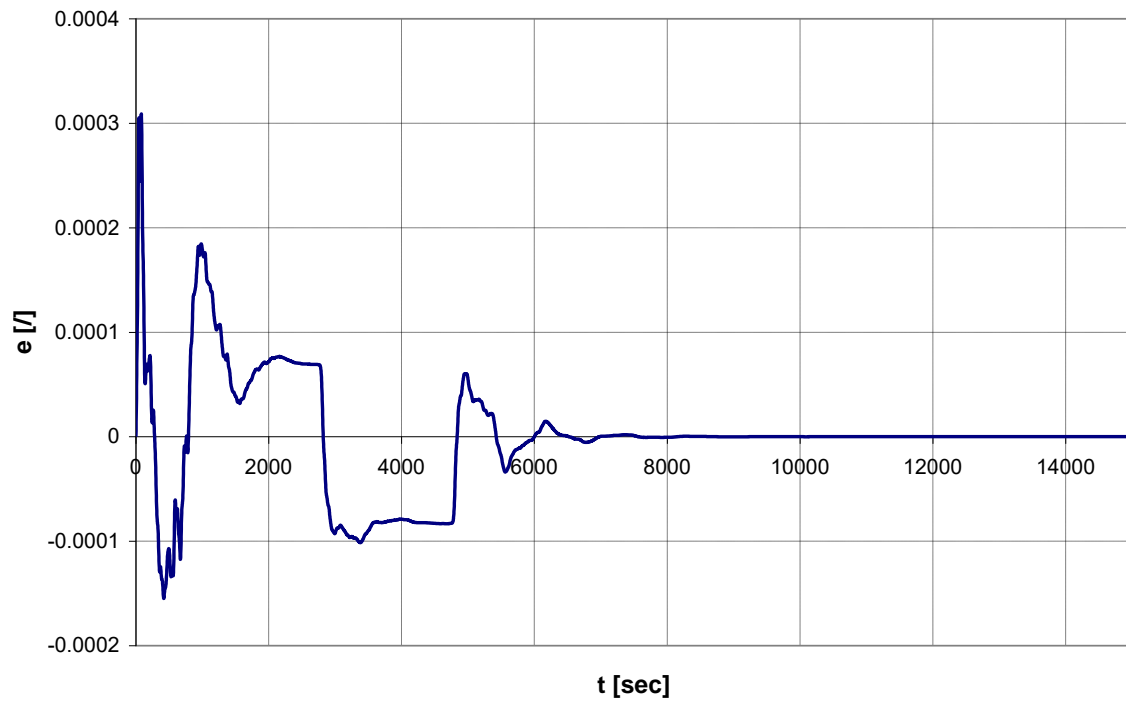
Слика 55. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 8

Nivogrami u racunskim presecima



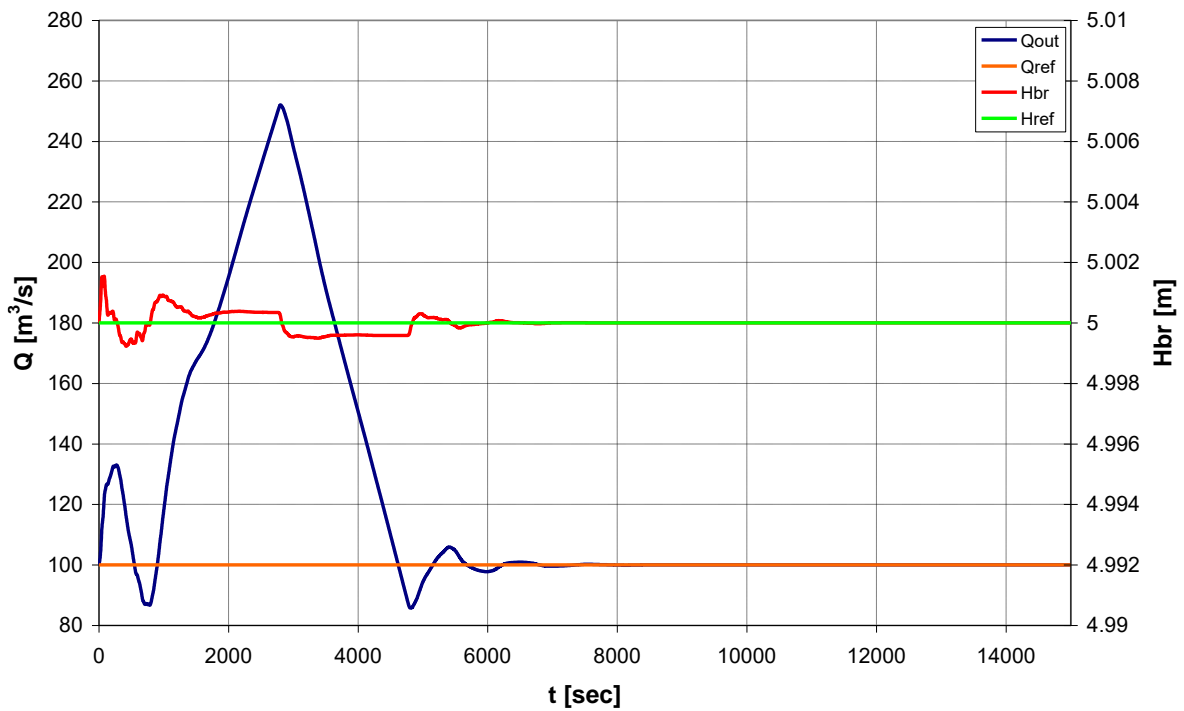
Слика 56. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 8

Greska (error)



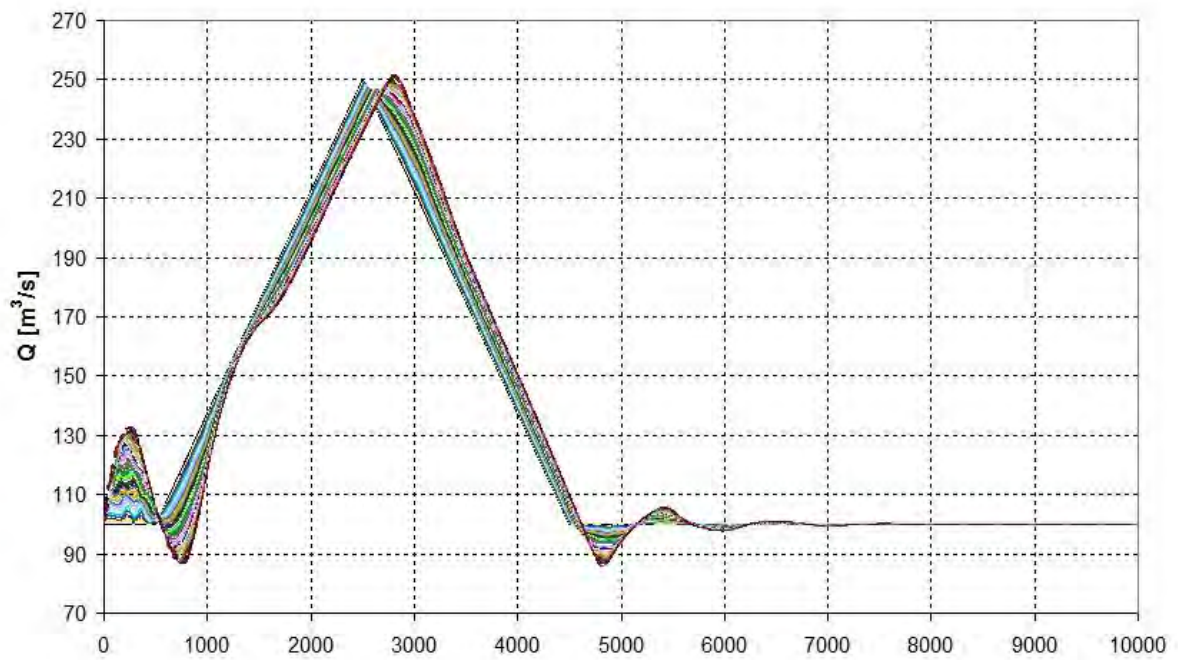
Слика 57. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 8

Nivo uz preliv i izlazni protok



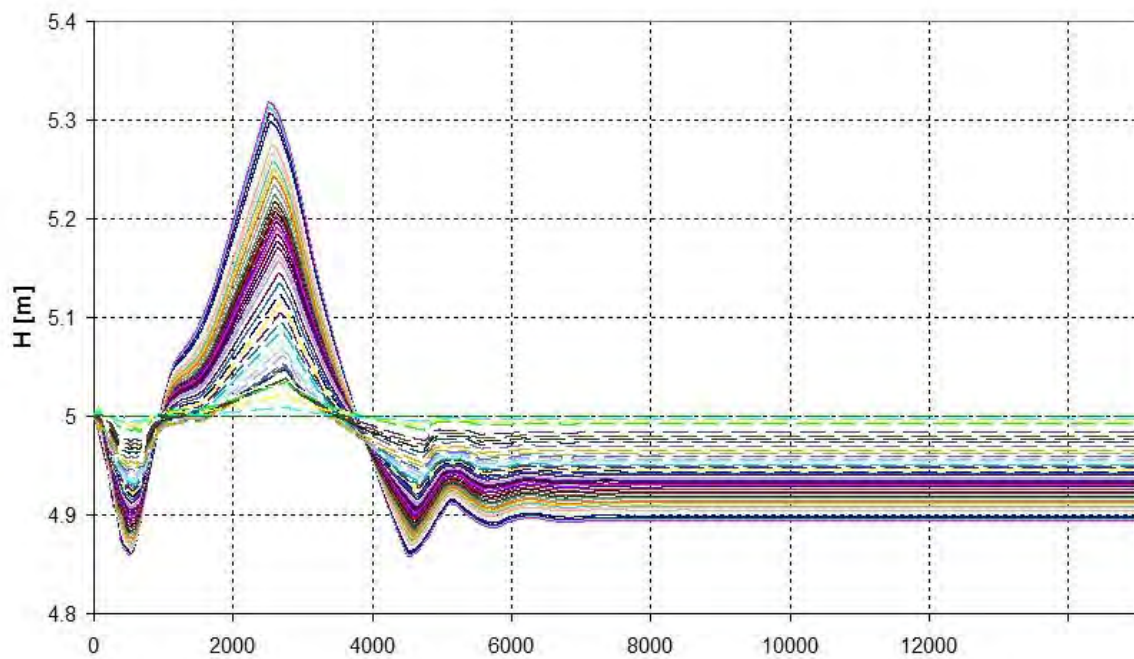
Слика 58. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 8

Hidrogrami u racunskim presecima



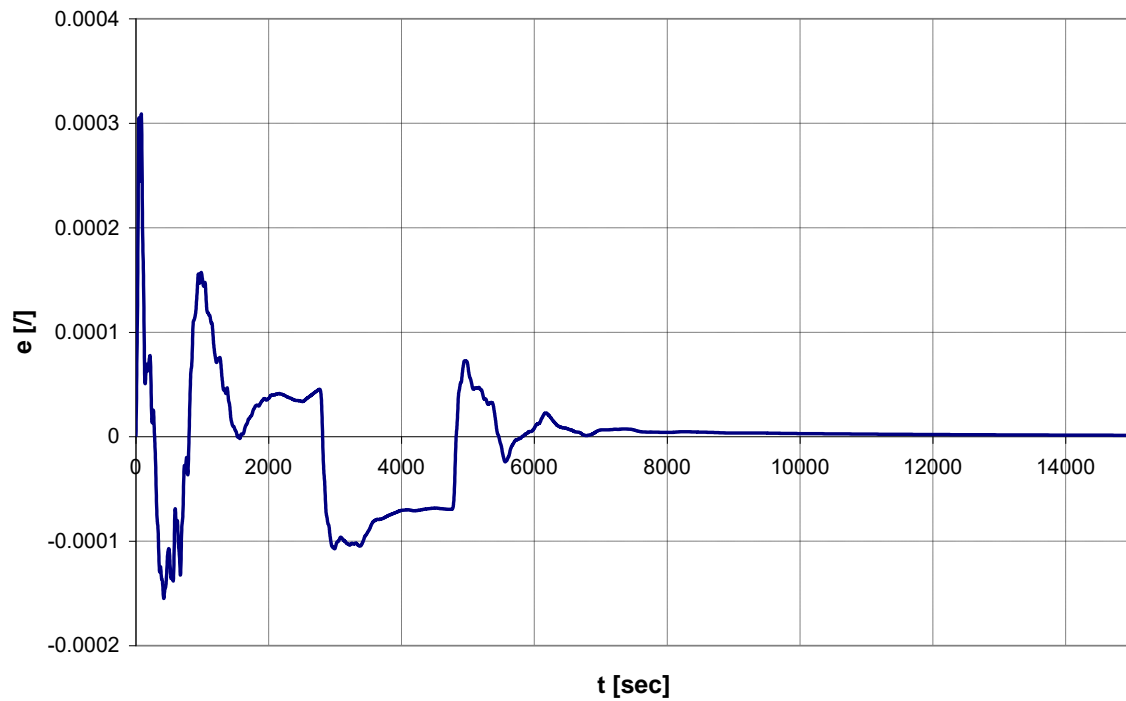
Слика 59. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 9

Nivogrami u racunskim presecima



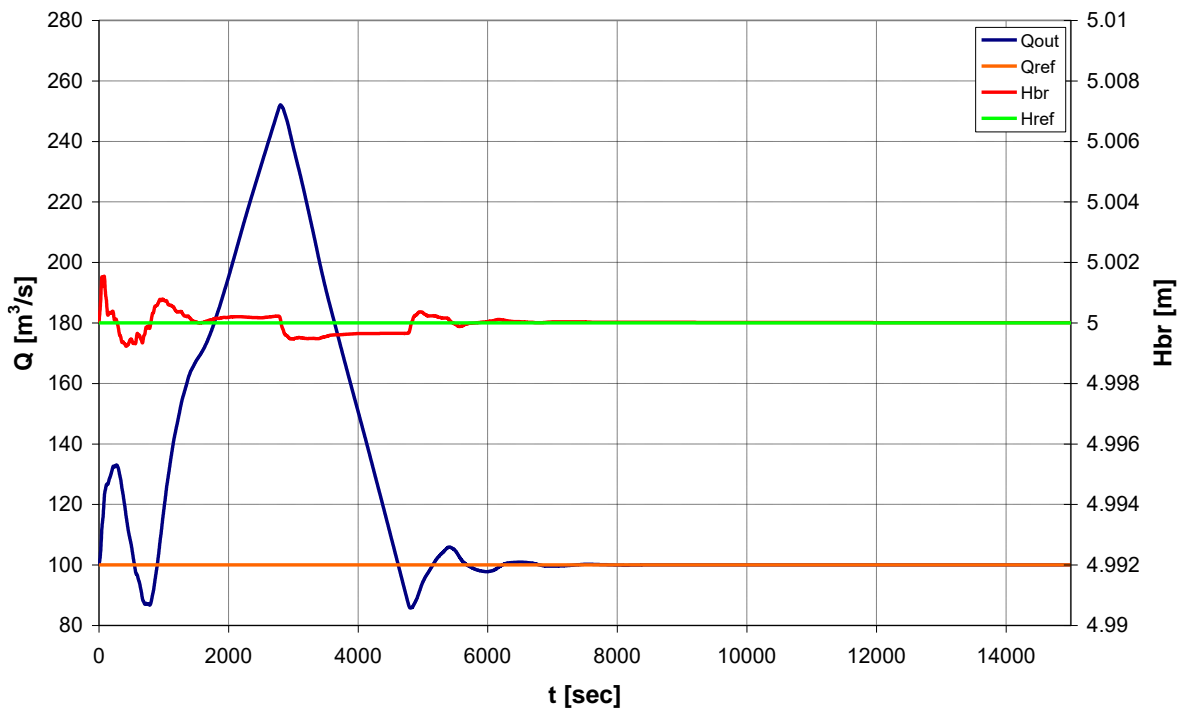
Слика 60. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 9

Greska (error)



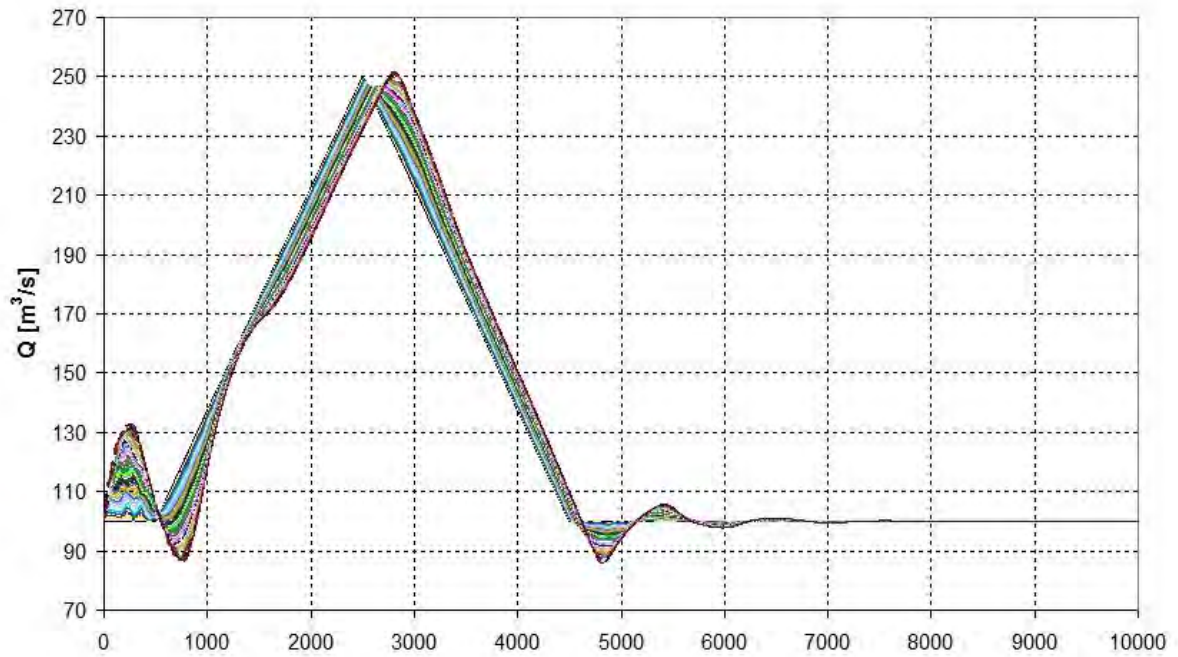
Слика 61. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 9

Nivo uz preliv i izlazni protok



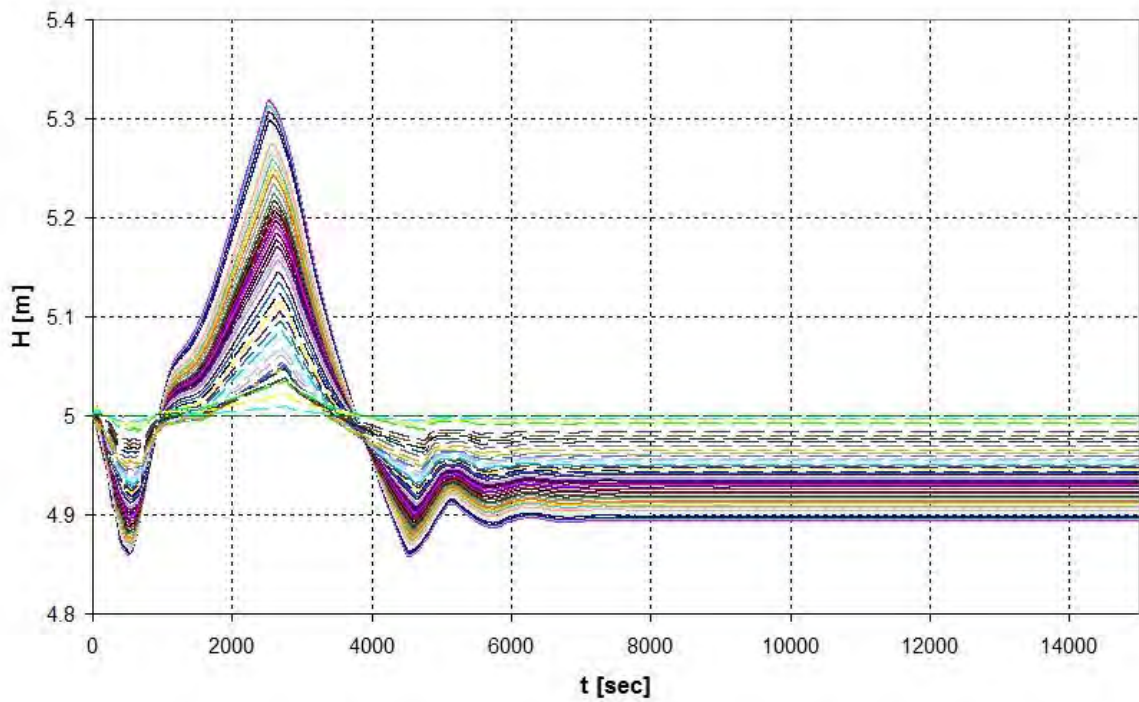
Слика 62. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 9

Hidrogrami u racunskim presecima



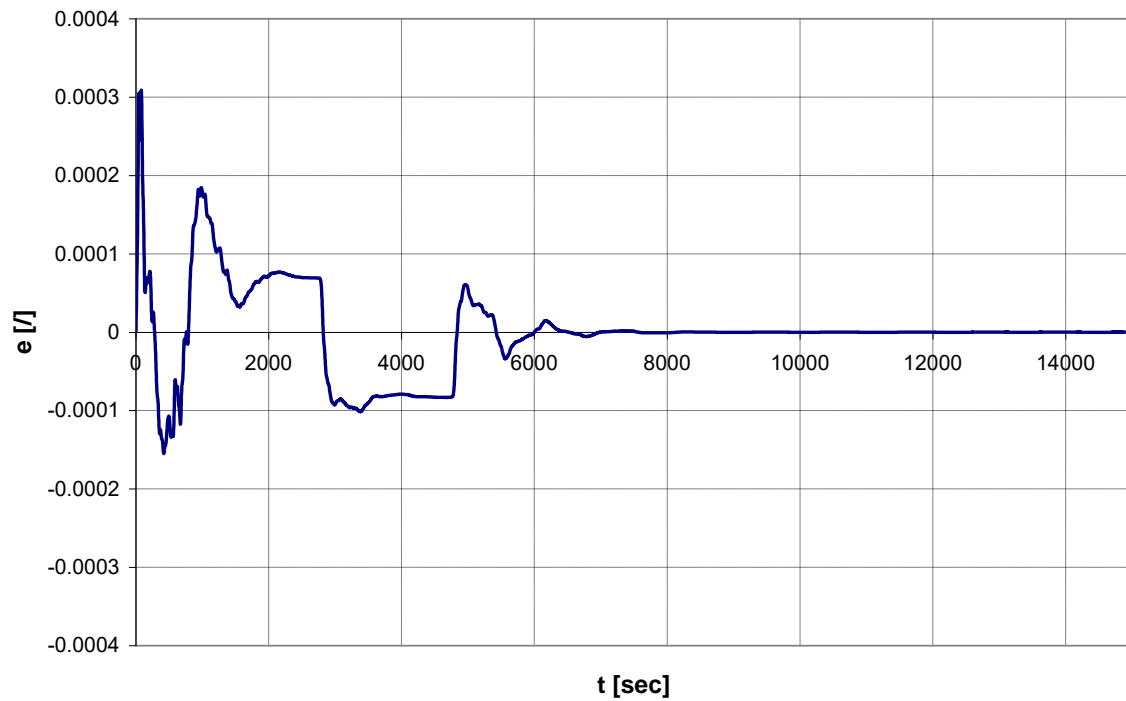
Слика 63. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 10

Nivogrami u racunskim presecima



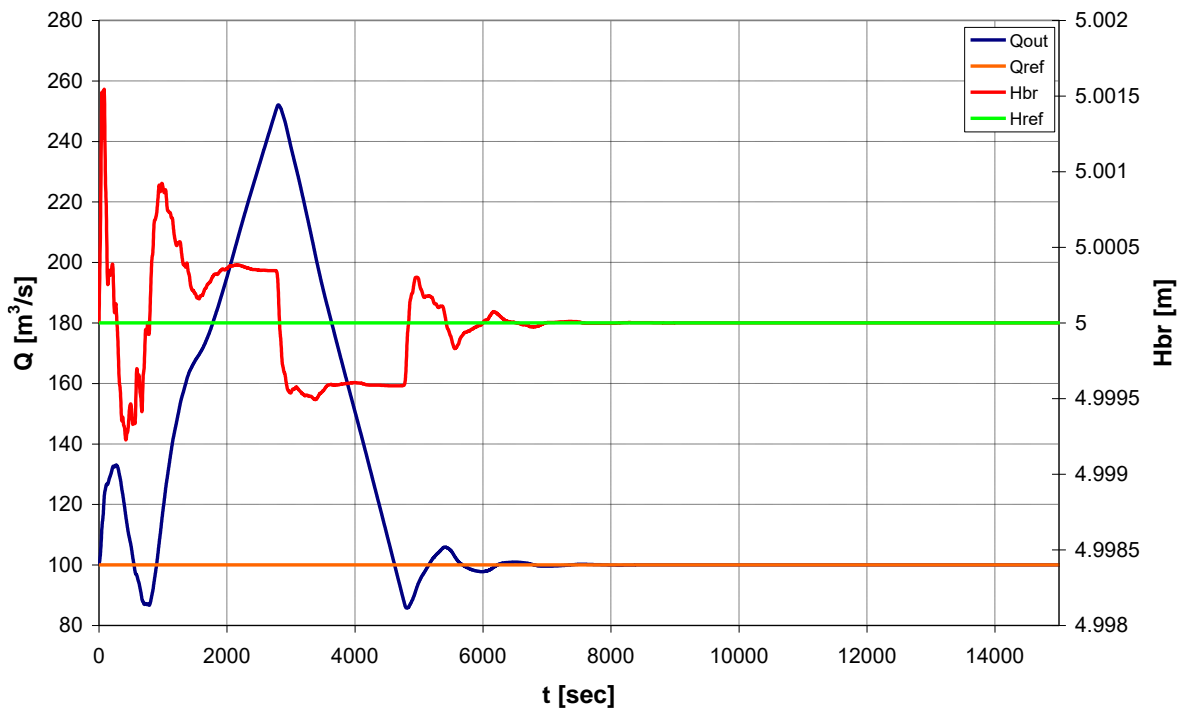
Слика 64. Нивограми у рачунским пресецима за варијанту параметара 10

Greska (error)



Слика 65. Грешка (error) као резултат рада PID контроле за варијанту параметара 10

Nivo uz preliv i izlazni protok



Слика 66. Ниво уз прелив и излазни хидрограм за варијанту параметара 10

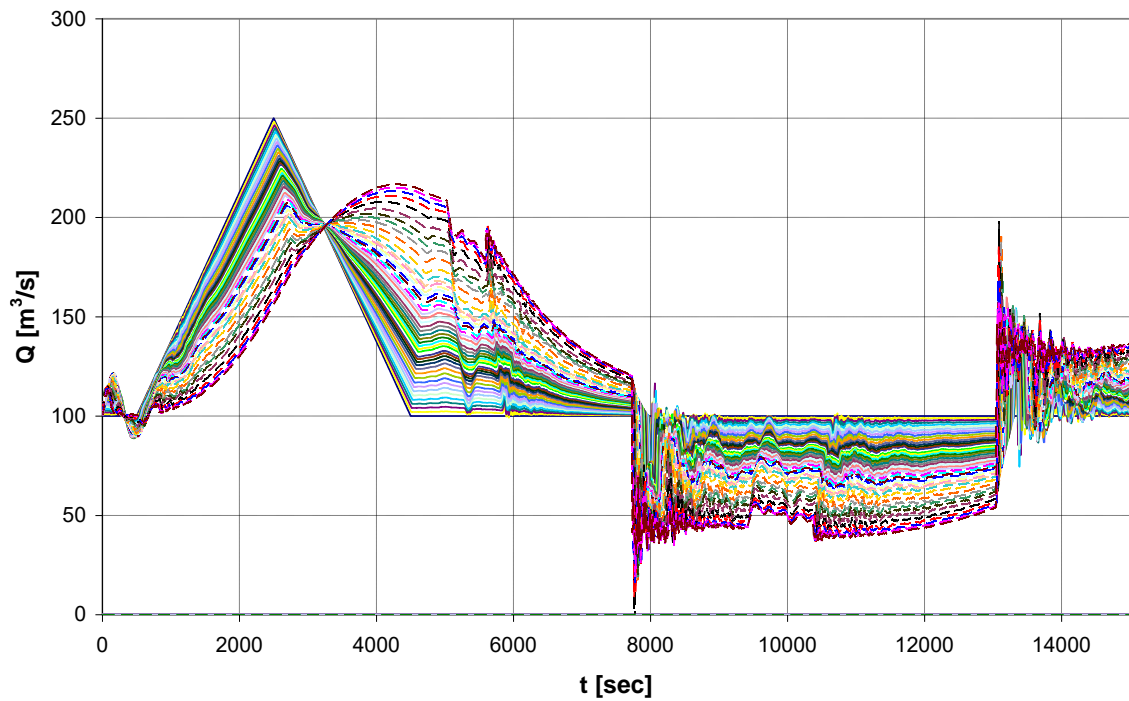
5.2 Резултати за модел приказан под 4.3

Претходни резултати односе се на модел у ком се рад преливних објеката представља само PID контролом, под претпоставком да у потпуности одговара. Међутим, као што је претходно напоменуто, преливни уређаји су карактеристични по томе што имају ограничену брзину подизања/спуштања. Због тога је испитан утицај различитих вредности брзина на побољшаном моделу који укључује и модел рада преливних објеката са поменутим ограничењима.

Табела 3. Испитане варијанте брзина ротације клапни

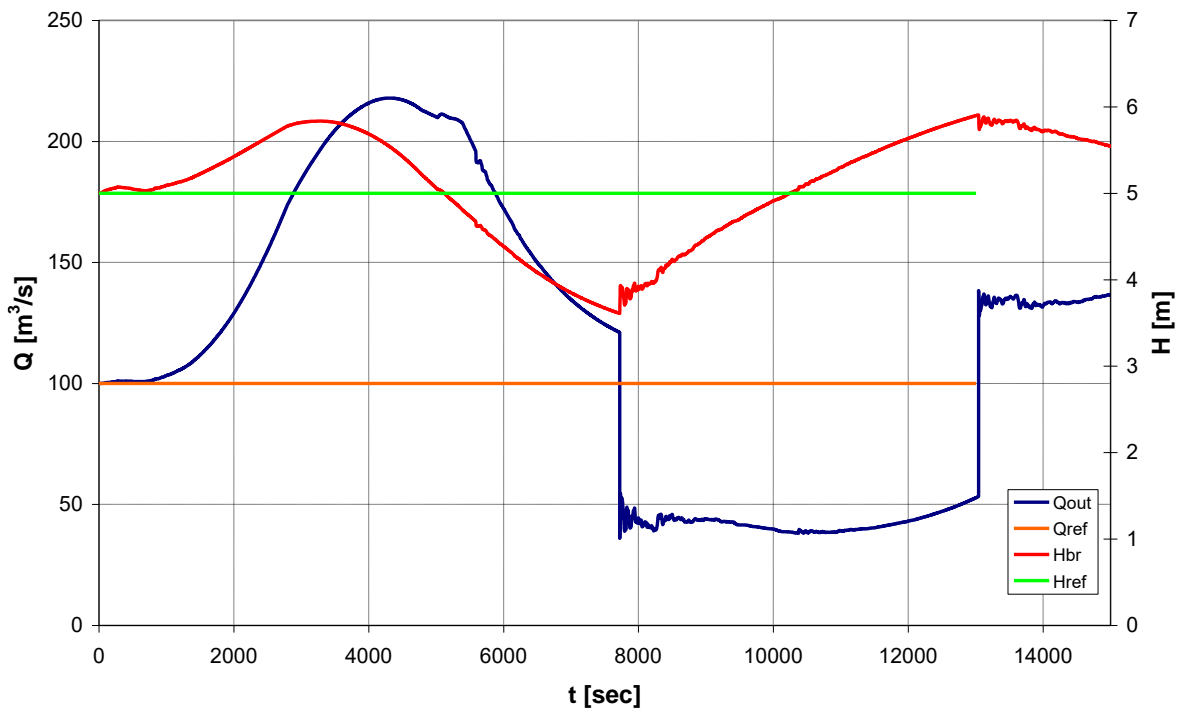
Варијанта	K_p	K_i	K_d	q_f	ω [deg/min]
1	200	10	0	Да	1
2	200	10	0	Да	2
3	200	10	0	Да	4.5
4	200	10	0	Да	6
5	200	10	0	Да	15
6	200	10	0	Да	20
7	200	10	0	Да	30
8	200	10	0	Да	45
9	200	10	0	Да	60
10	200	10	0	Да	90

Hidrogrami u racunskim presecima



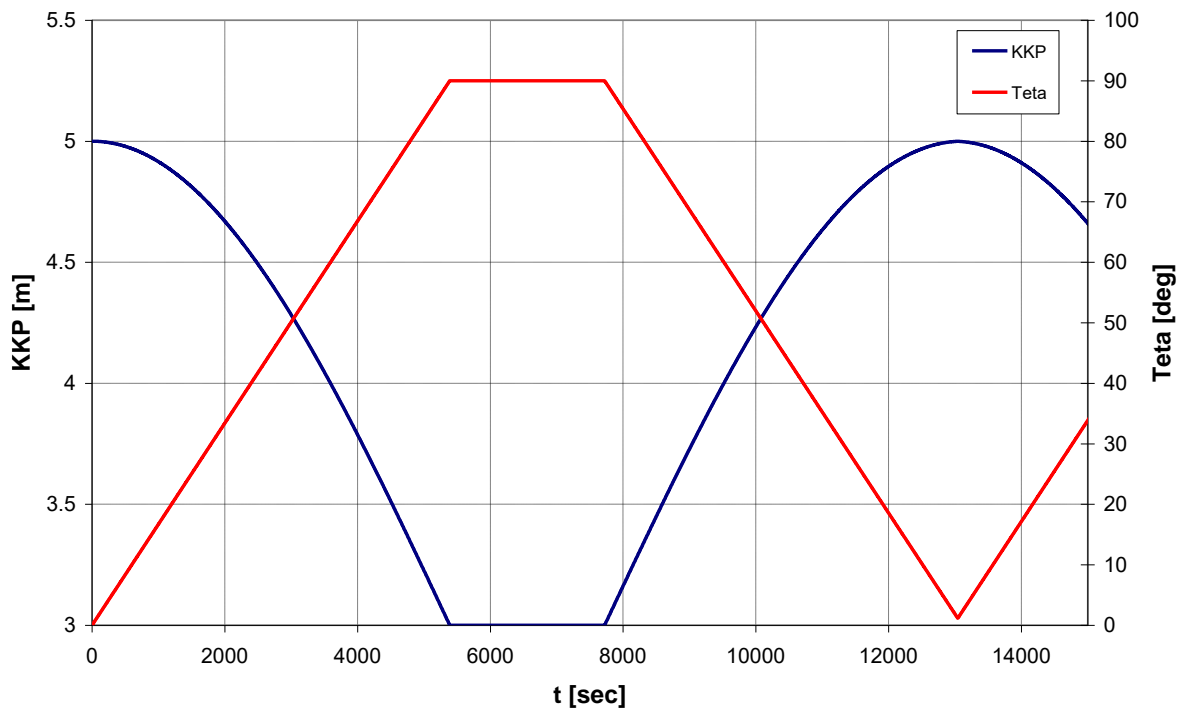
Слика 67. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 1

Nivo uz preliv i izlazni protok



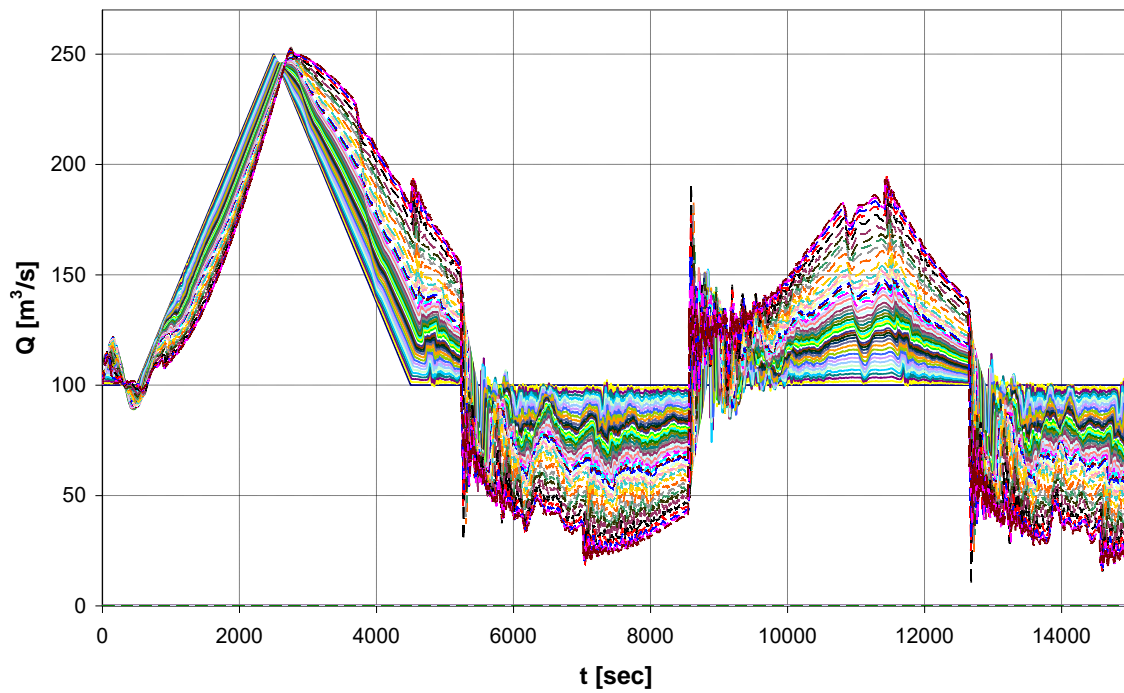
Слика 68. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 1

Kota krune preлива i poloжај kлапне



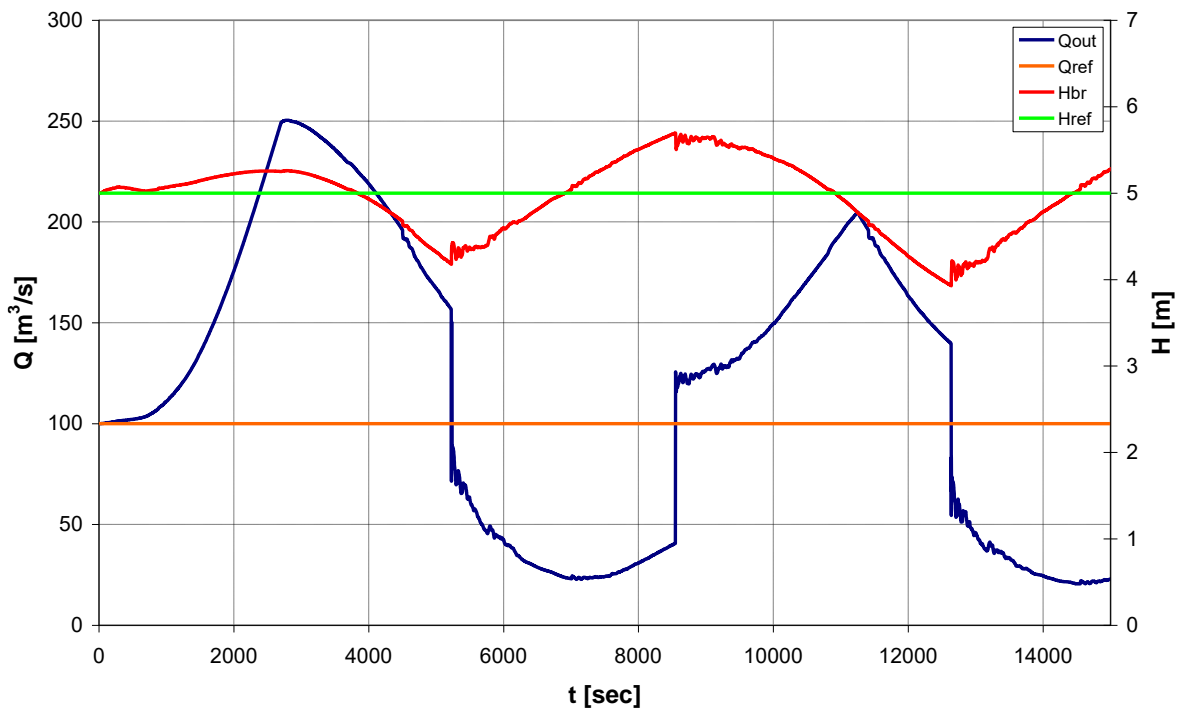
Слика 69. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 1

Хидрограми у рачунским пресецима



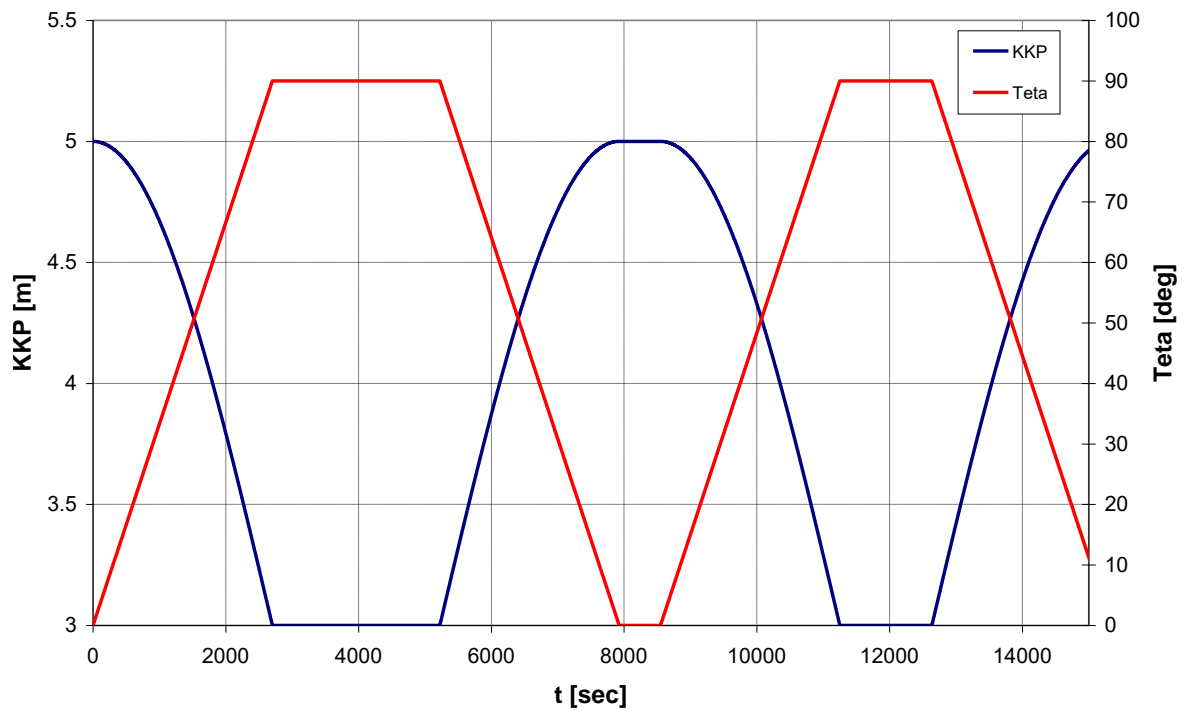
Слика 70. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 2

Nivo uz preliv i izlazni protok



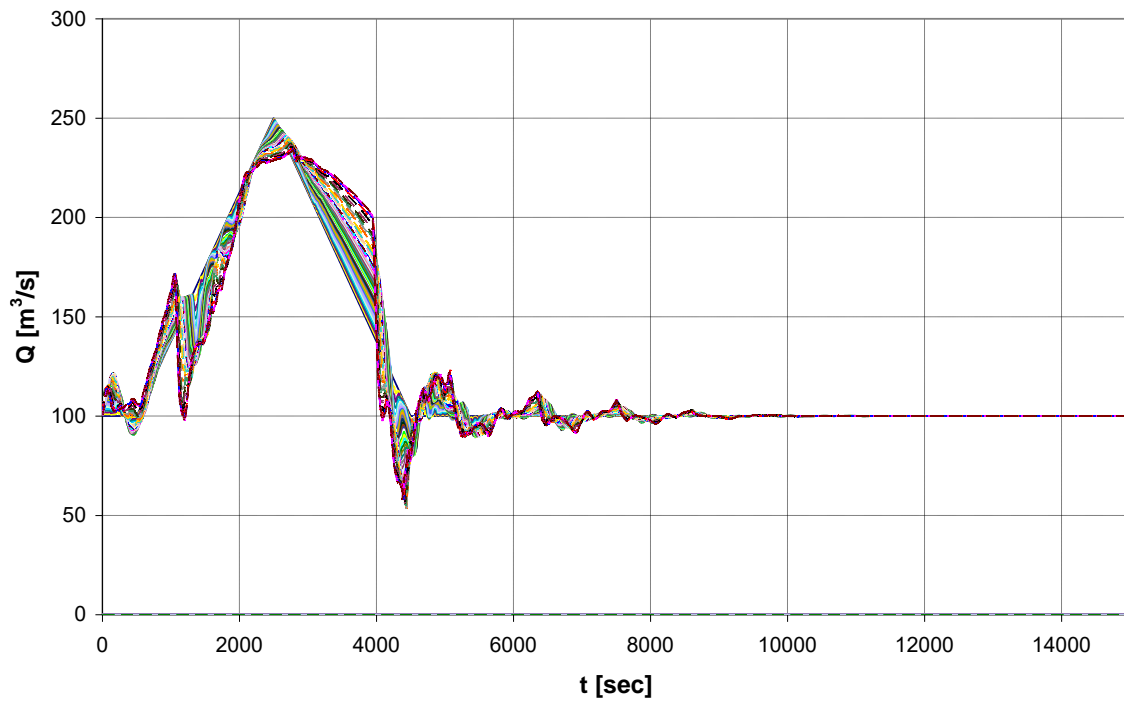
Слика 71. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 2

Kota krune preliwa i poloжај klapne



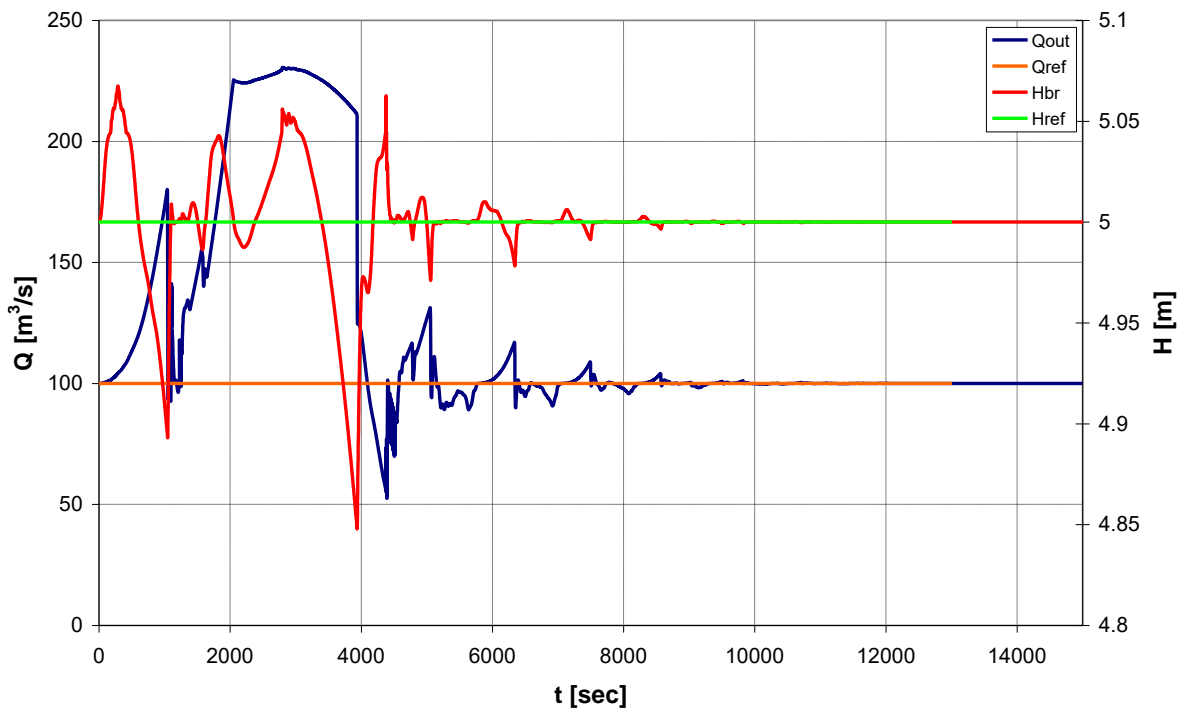
Слика 72. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 2

Hidrogrami u racunskim presecima



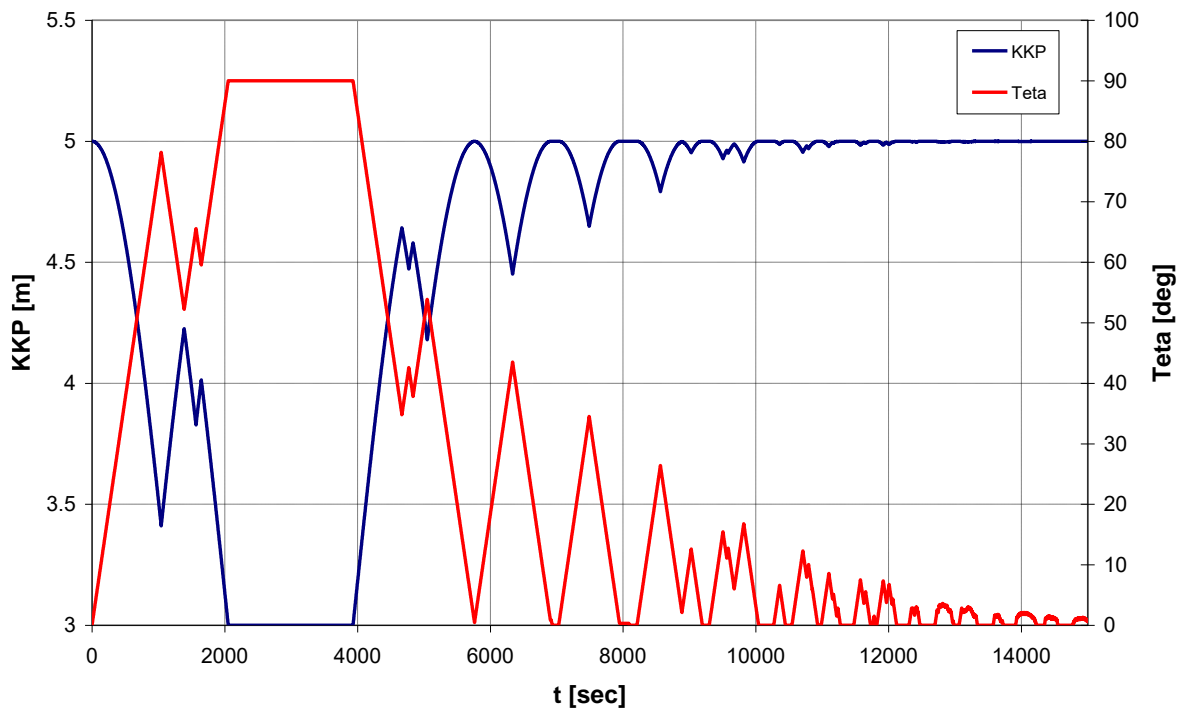
Слика 73. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 3

Nivo uz preliv i izlazni protok



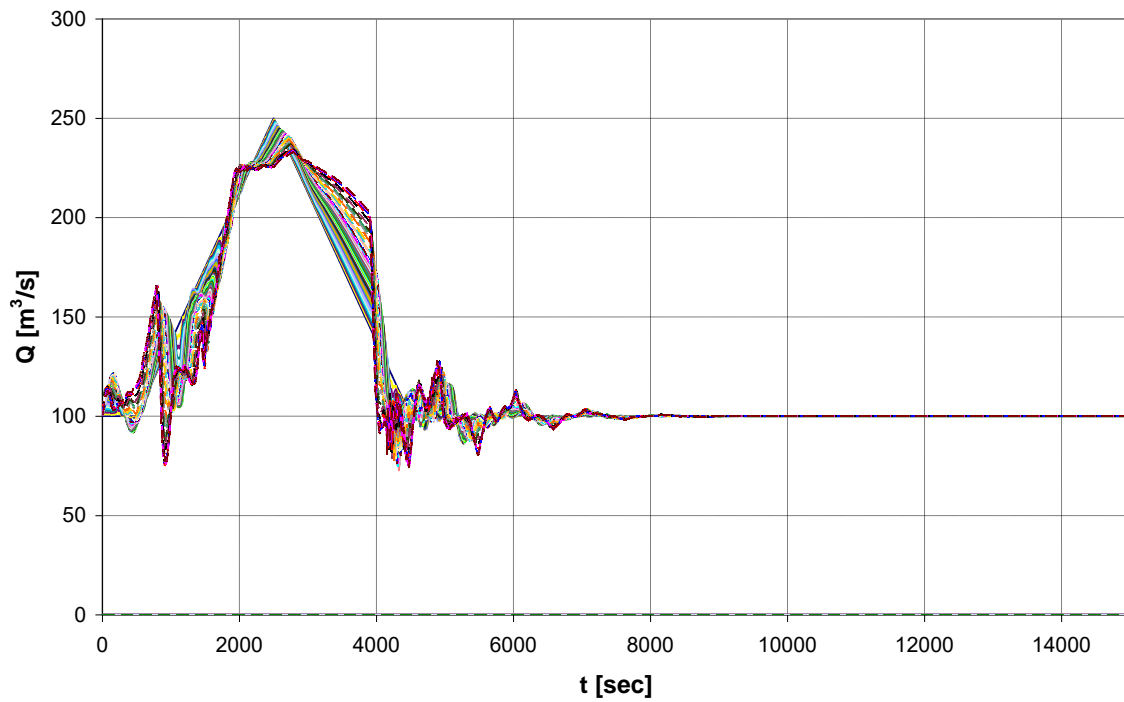
Слика 74. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 3

Kota krune preliva i položaj klapne



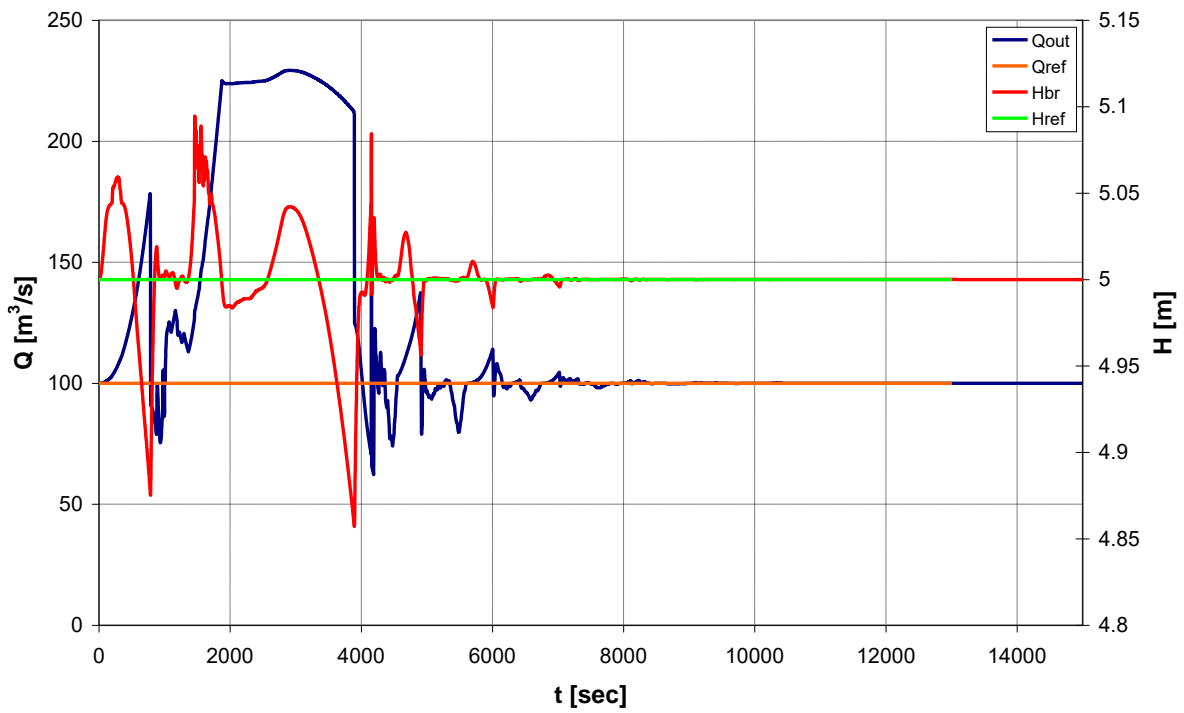
Слика 75. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 3

Hidrogrami u racunskim presecima



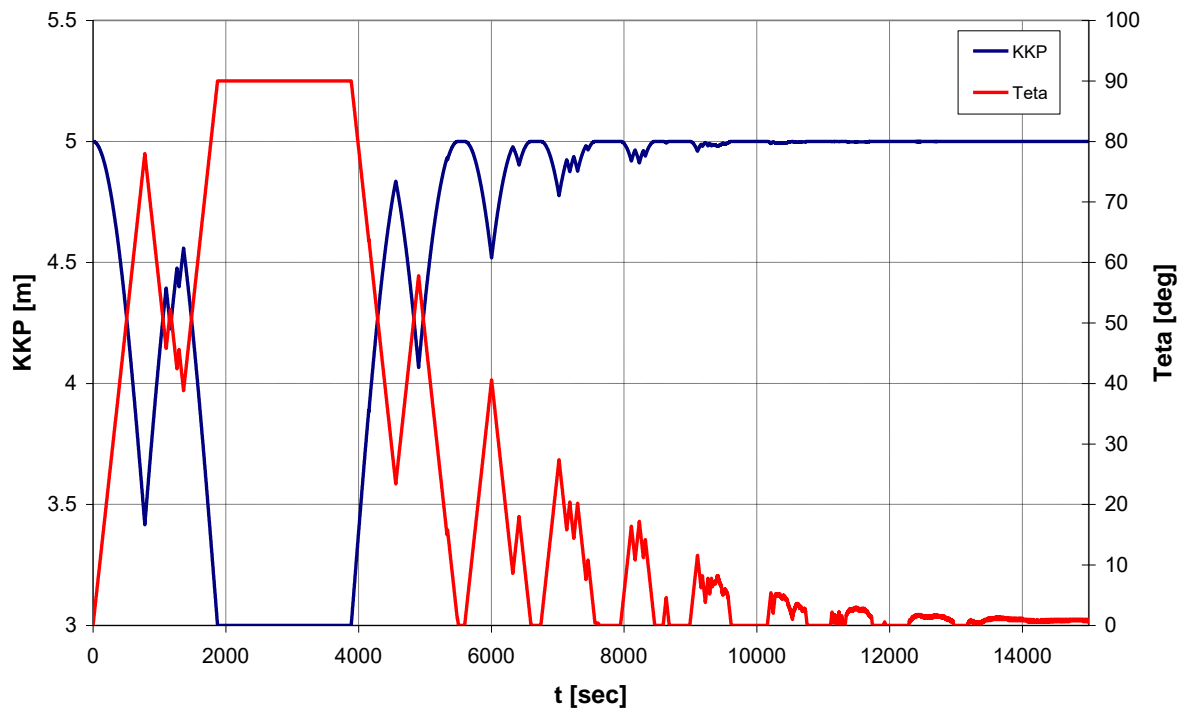
Слика 76. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 4

Nivo uz preliv i izlazni protok



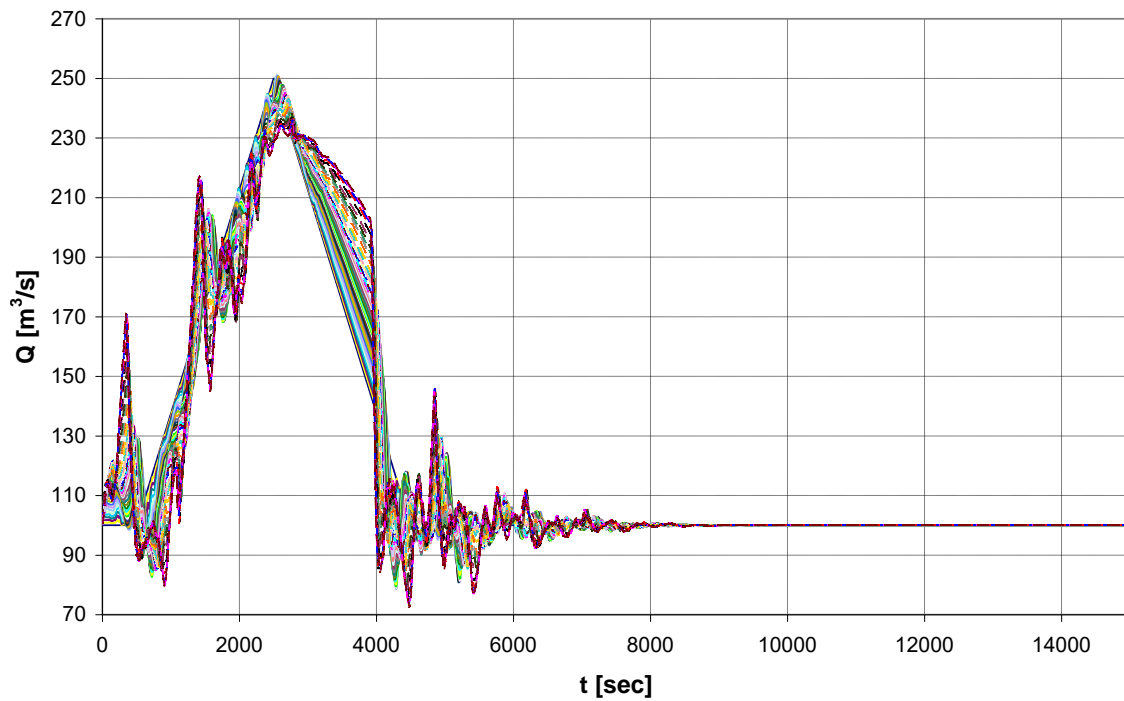
Слика 77. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 4

Kota krune preлива i položaj klapne



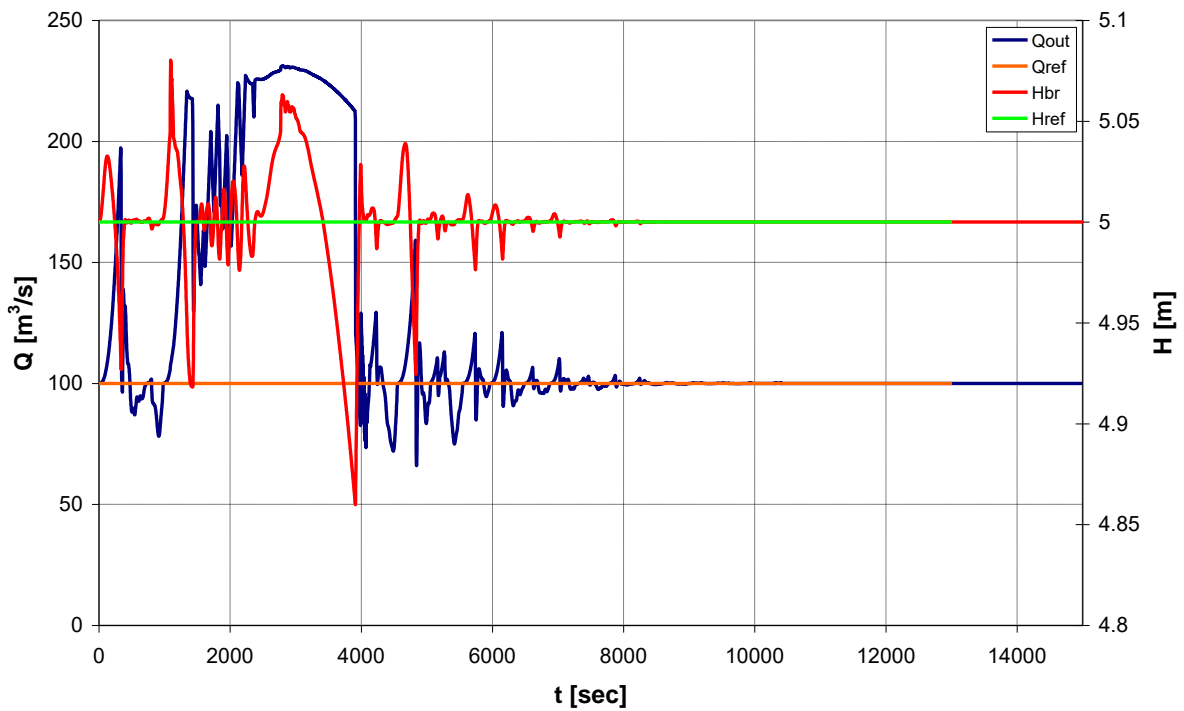
Слика 78. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 4

Hidrogrami u racunskim presecima



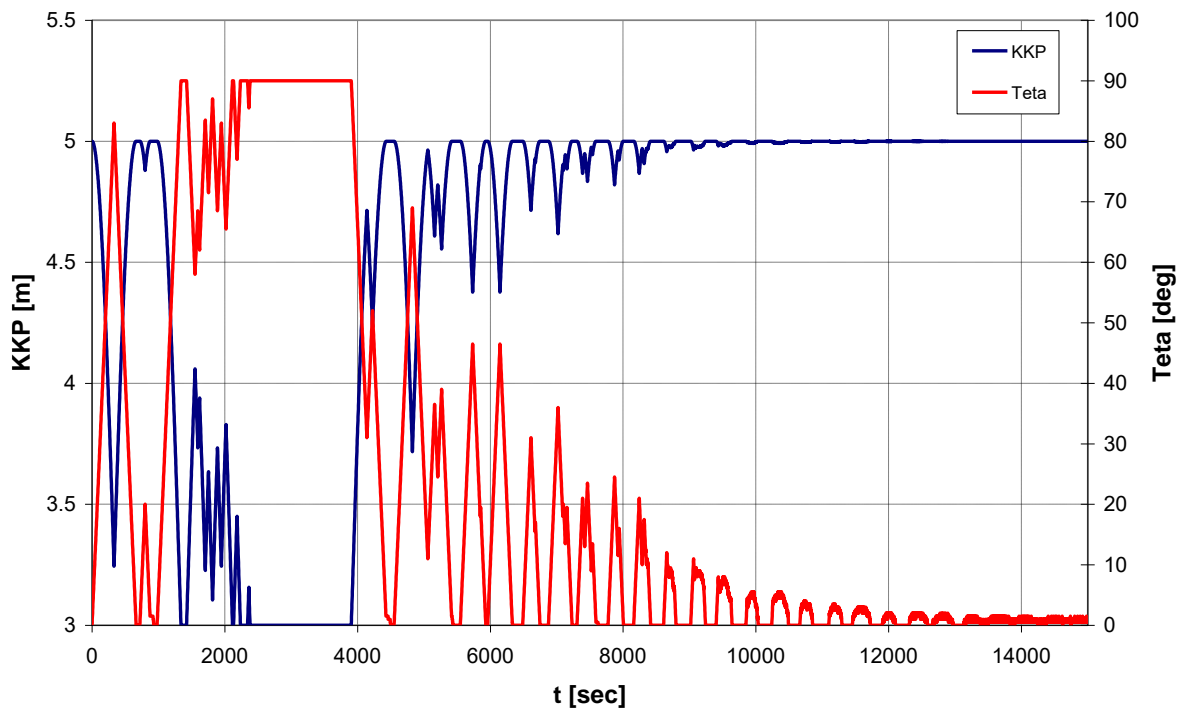
Слика 79. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 5

Nivo uz preliv i izlazni protok



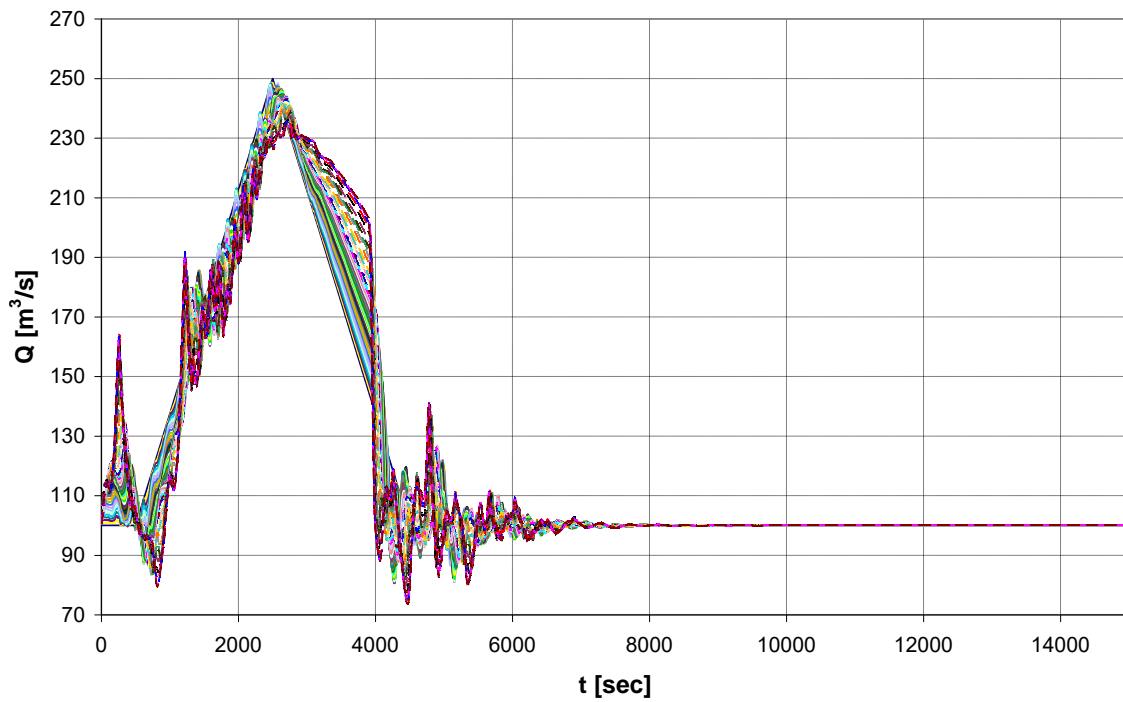
Слика 80. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 5

Kota krune preliva i položaj klapne



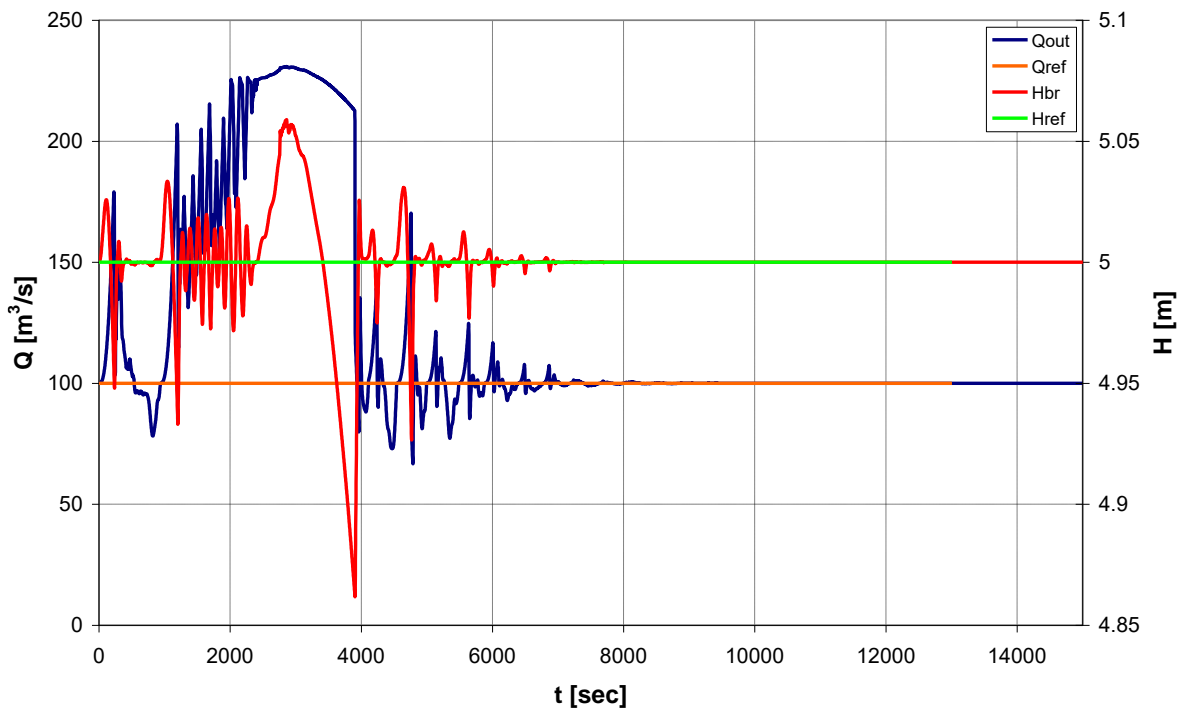
Слика 81. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 5

Hidrogrami u racunskim presecima



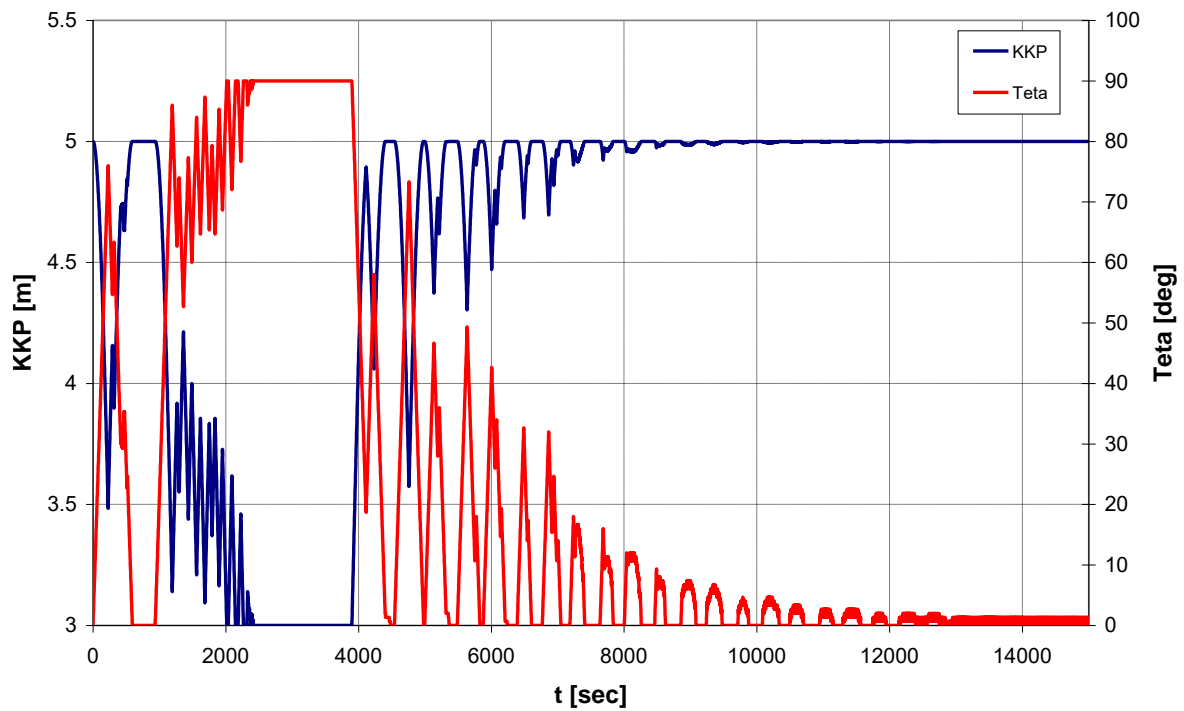
Слика 82. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 6

Nivo uz preliv i izlazni protok



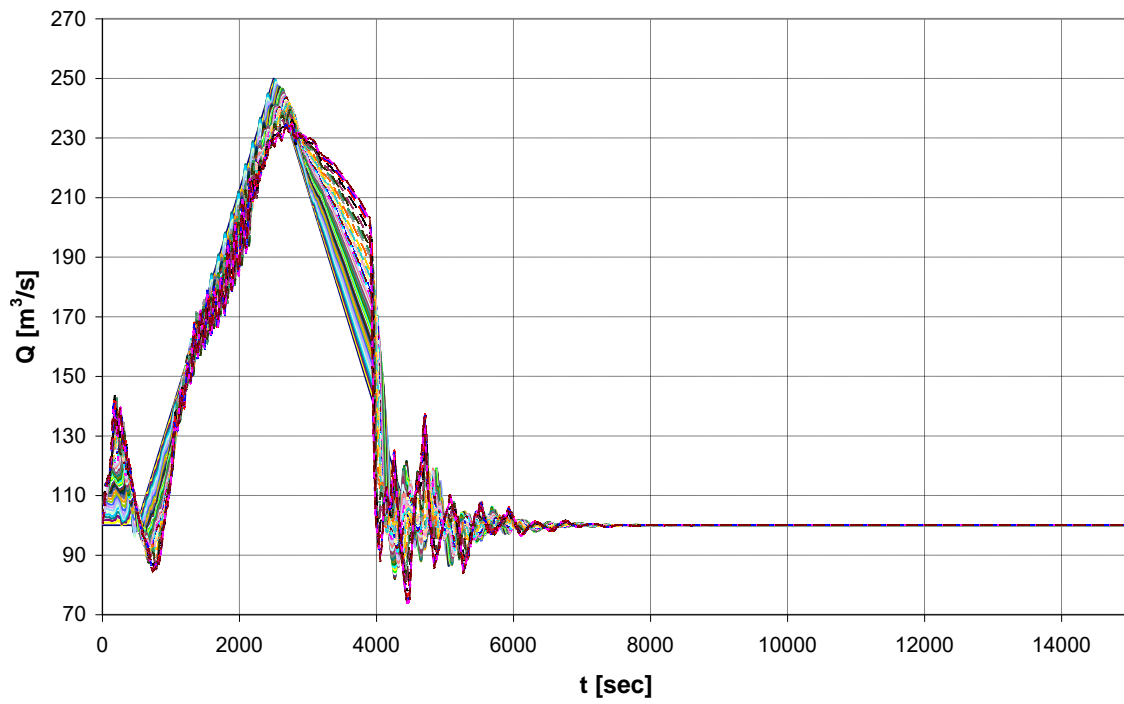
Слика 83. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 6

Kota krune preлива i položaj klapne



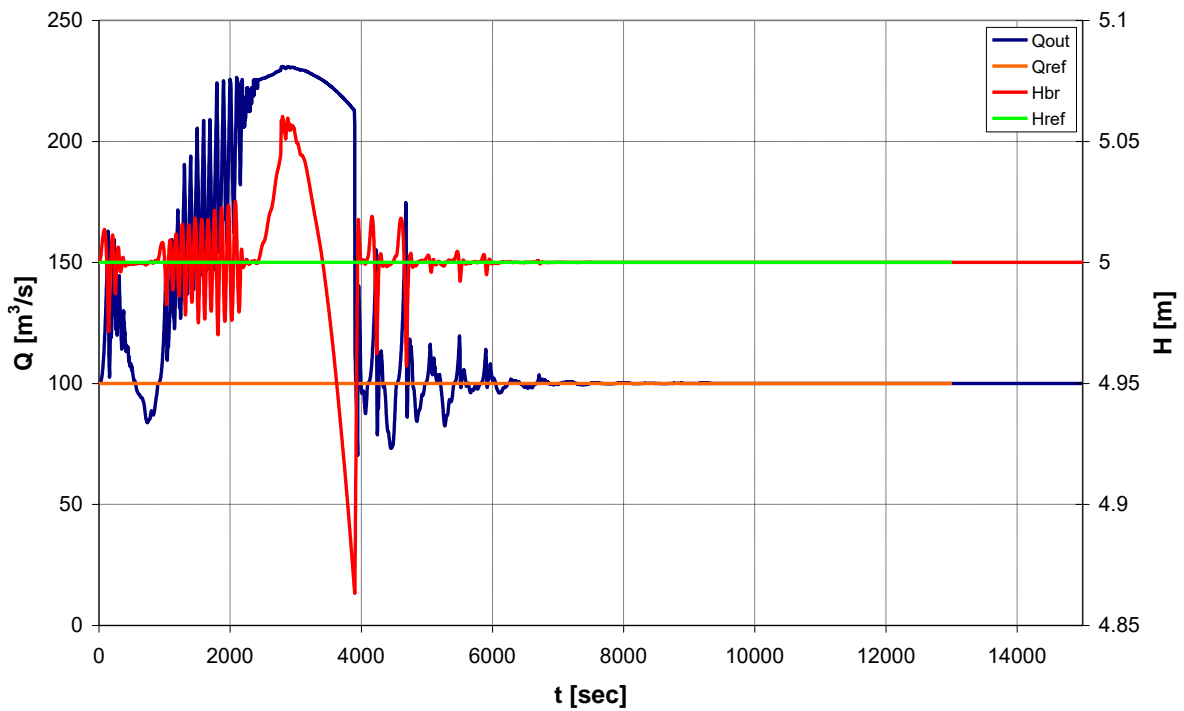
Слика 84. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 6

Hidrogrami u racunskim presecima



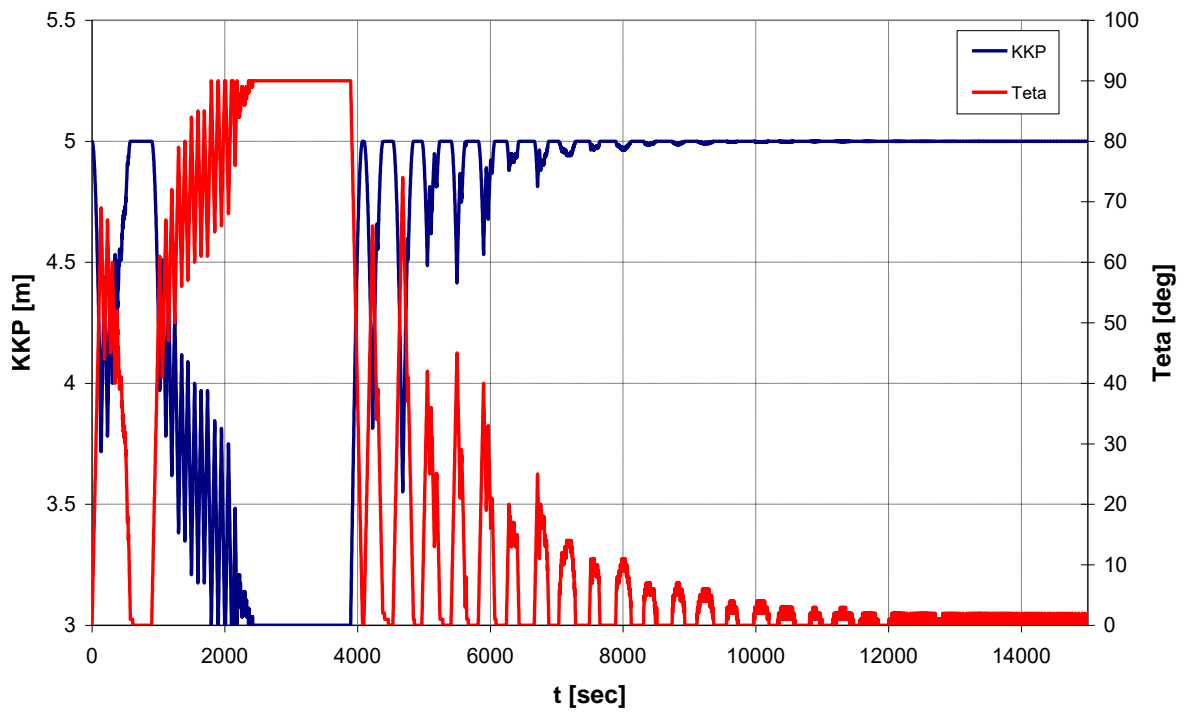
Слика 85. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 7

Nivo uz preliv i izlazni protok



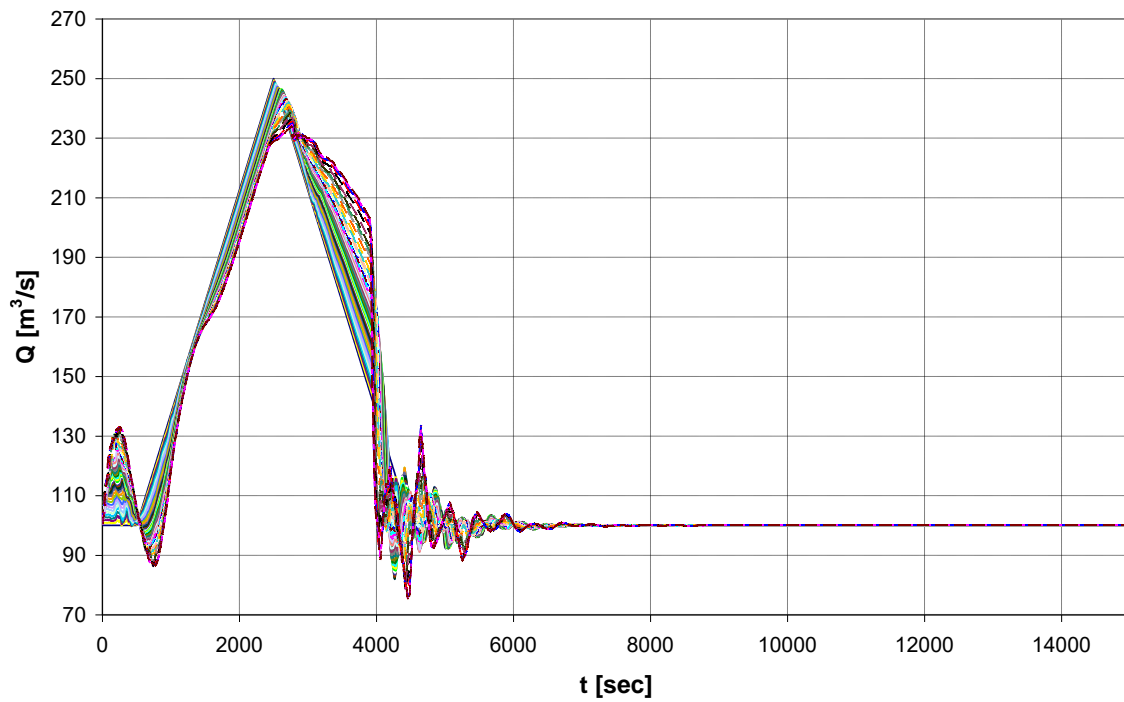
Слика 86. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 7

Kota krune preliva i položaj klapne



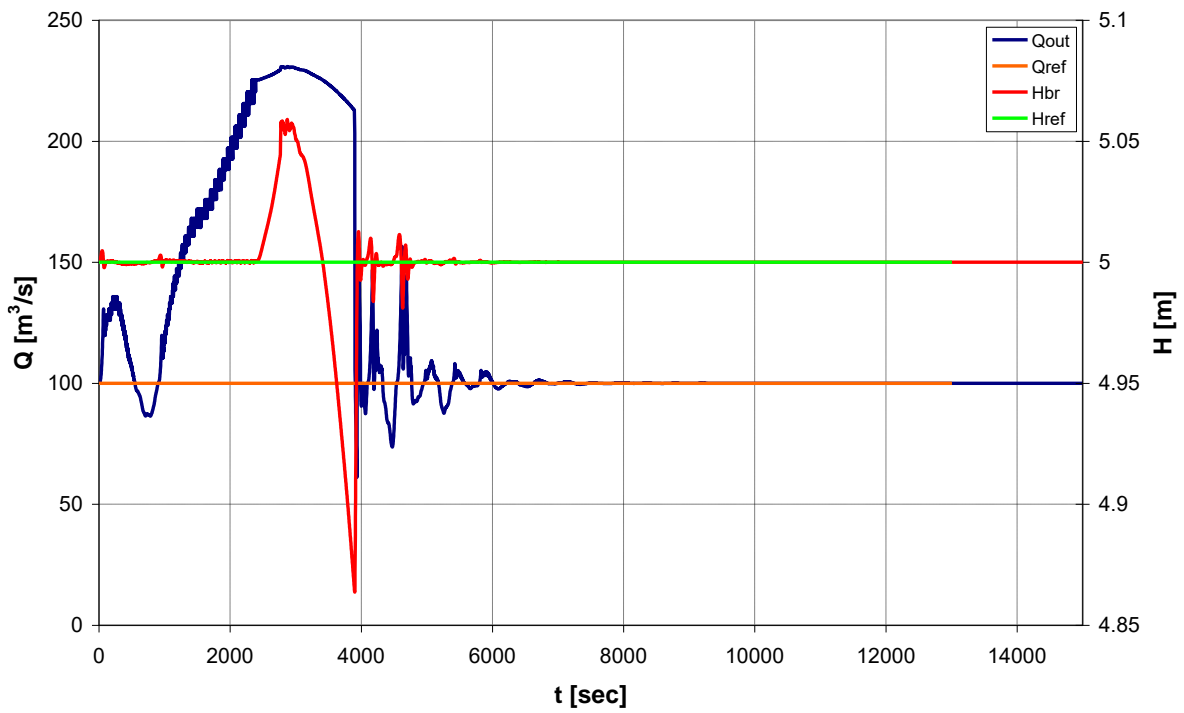
Слика 87. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 7

Hidrogrami u racunskim presecima



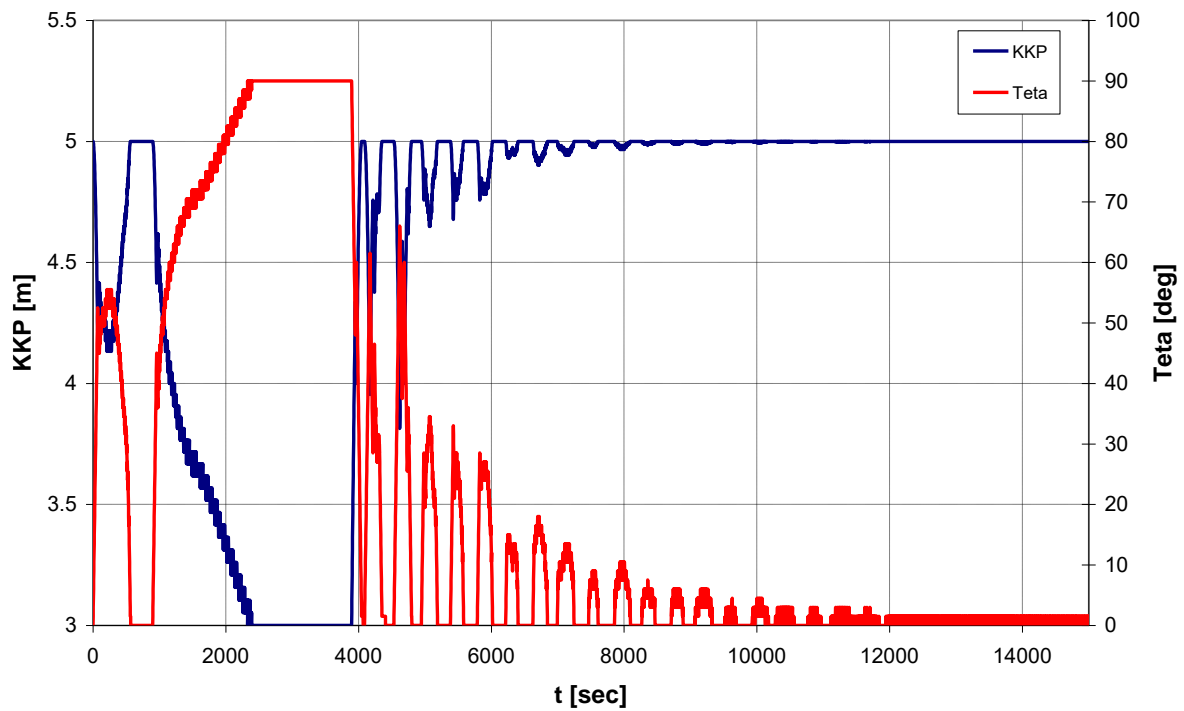
Слика 88. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 8

Nivo uz preliv i izlazni protok



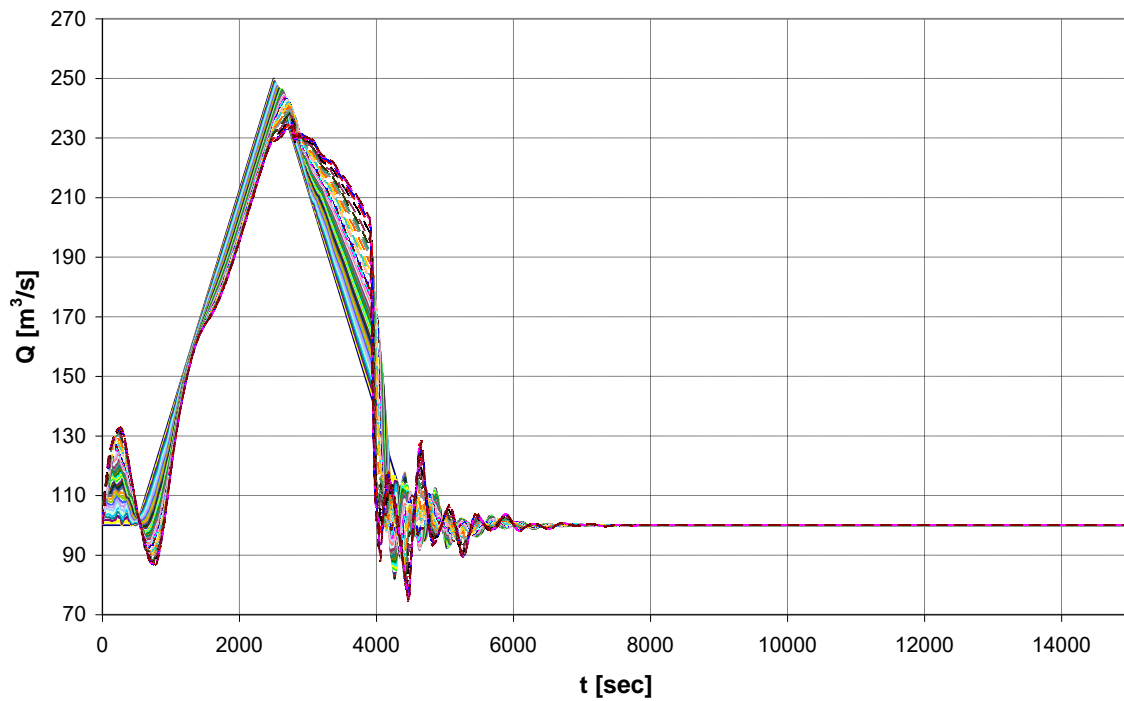
Слика 89. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 8

Kota krune preliva i položaj klapne



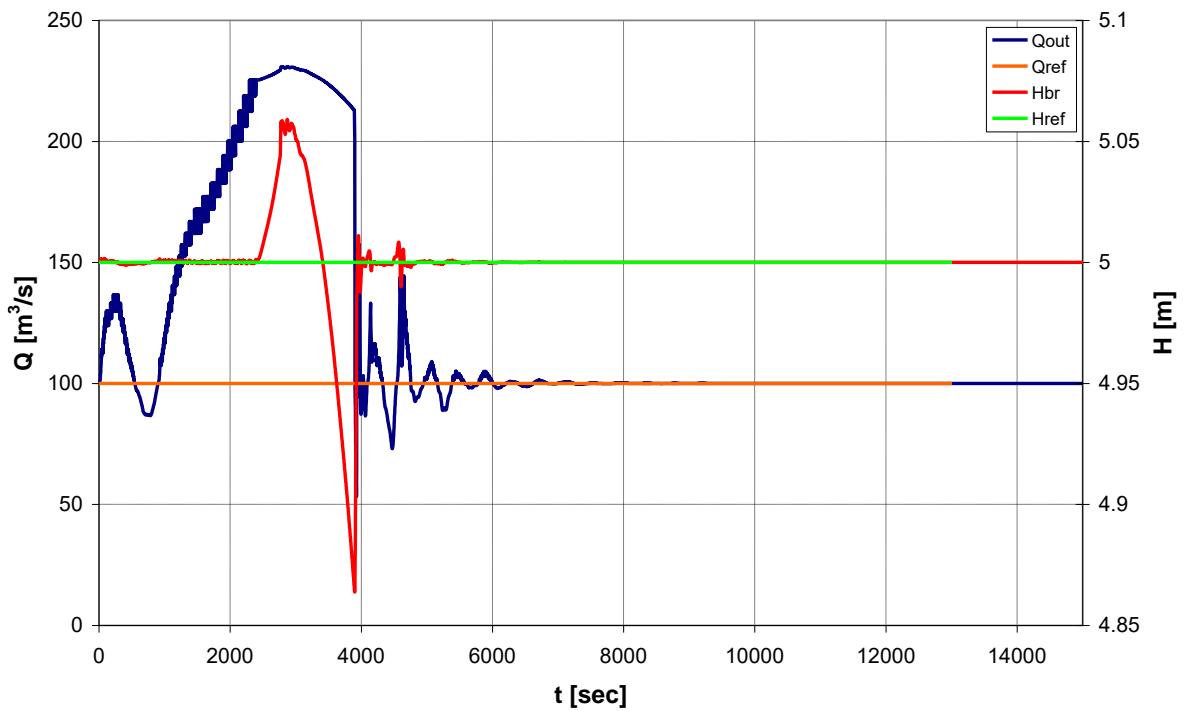
Слика 90. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 8

Hidrogrami u racunskim presecima



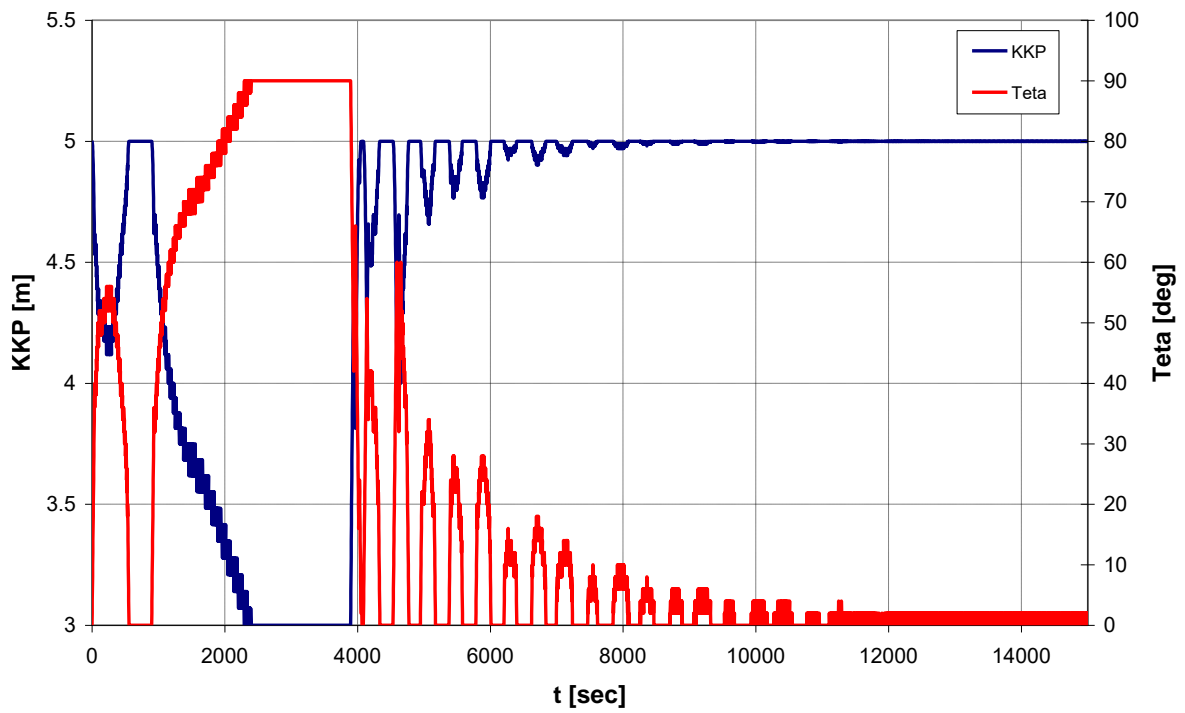
Слика 91. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 9

Nivo uz preliv i izlazni protok



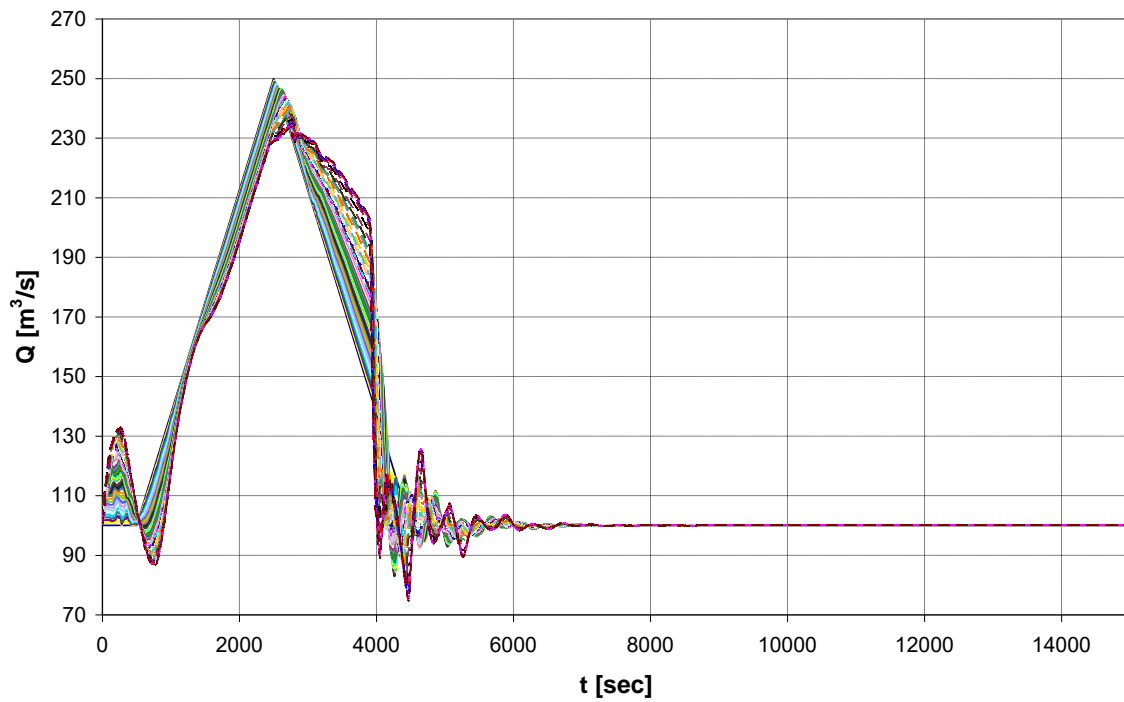
Слика 92. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 9

Kota krune preliva i položaj klapne



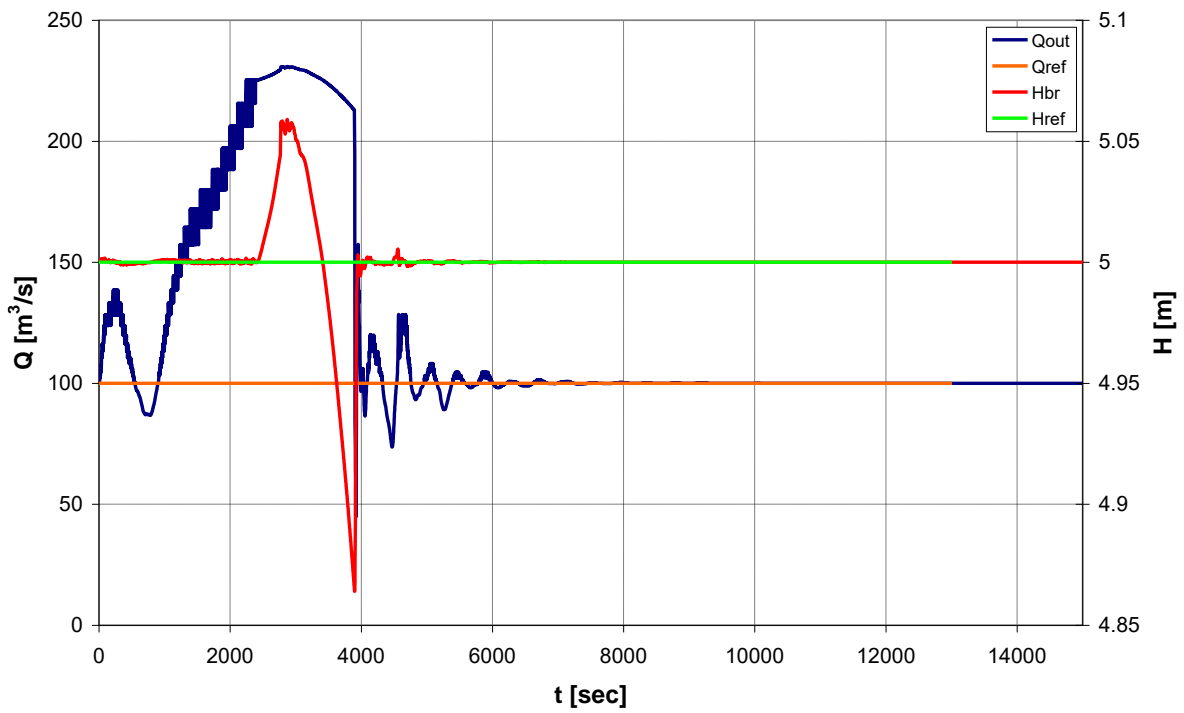
Слика 93. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 9

Hidrogrami u racunskim presecima



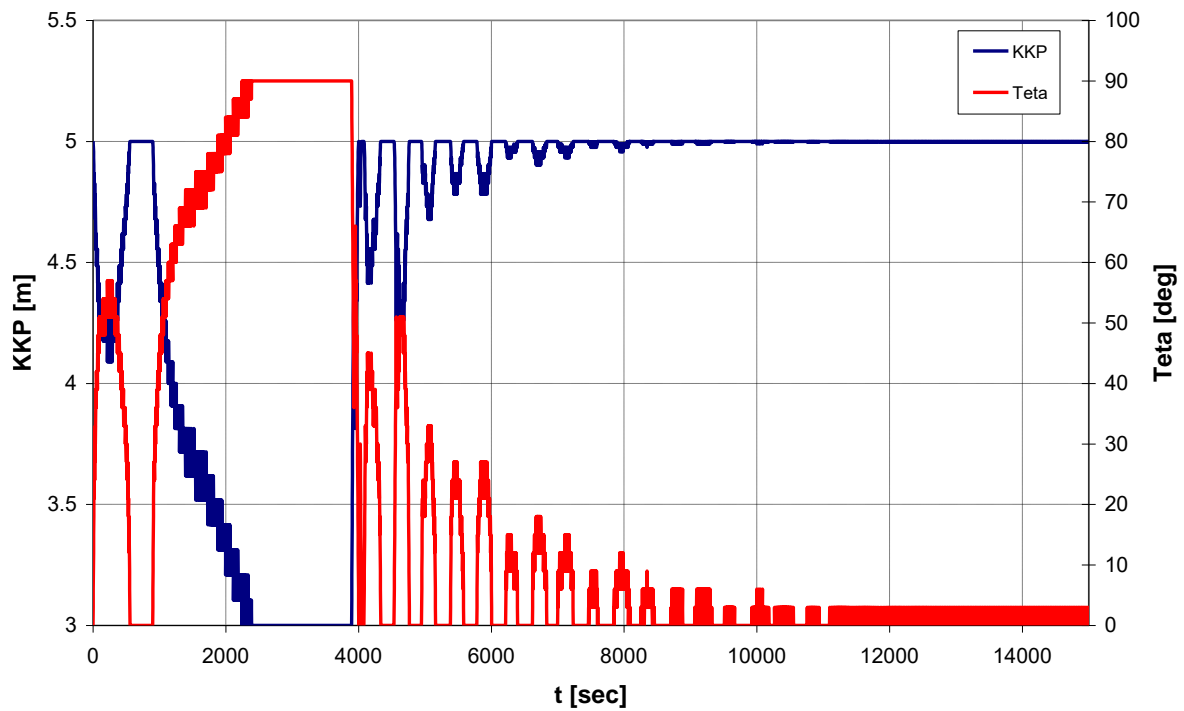
Слика 94. Хидрограми у рачунским пресецима за варијанту 10

Nivo uz preliv i izlazni protok



Слика 95. Ниво уз прелив и излазни проток за варијанту 10

Kota krune preлива i položaj klapne



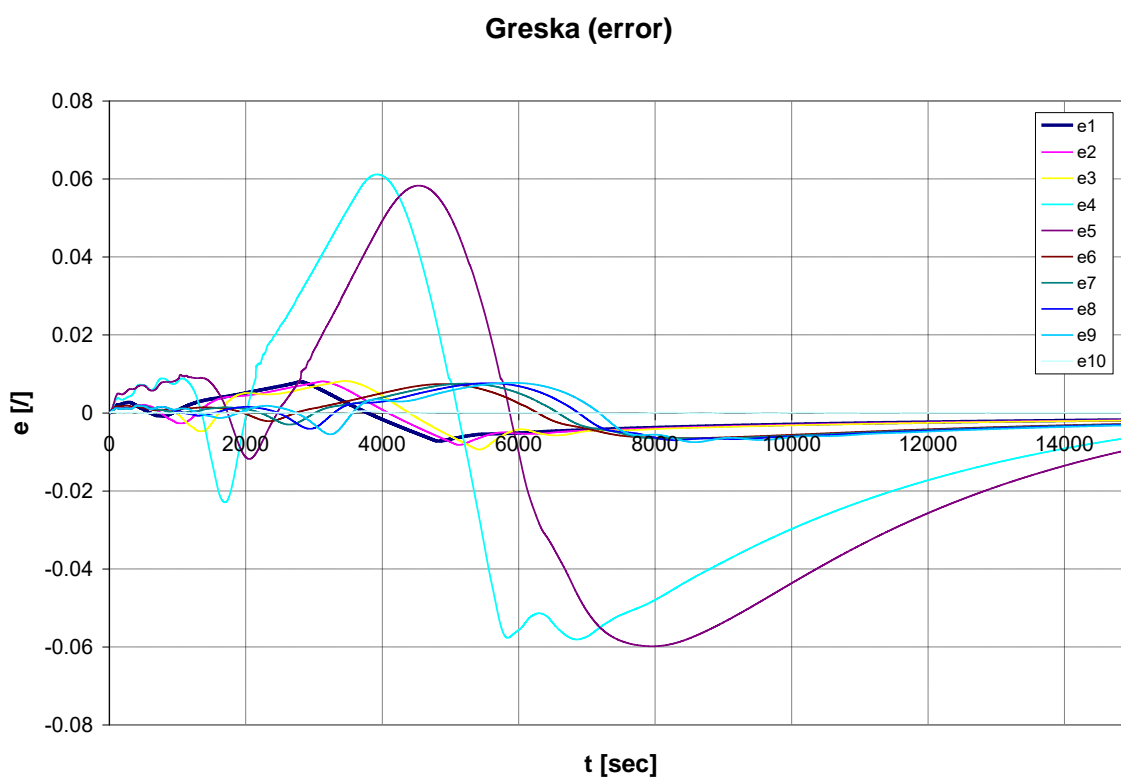
Слика 96. Кота круне прелива и положај клапне за варијанту 10

5.3 Резултати за модел приказан под 4.4

Модел каскадног хидроенергетског система у коме се рад преливних објеката моделира PID контролом састоји се од 10 акумулација и хидроелектрана. Утицај контролних параметара на резултате је значајан, у толикој мери да одређене вредности параметара могу да створе нестабилан прорачун, па је према томе потребно одредити вредност оптималних параметара за сваку хидроелектрану посебно. Резултати приказани за модел под 4.4 добијени су за следеће вредности параметара за сваку ХЕ:

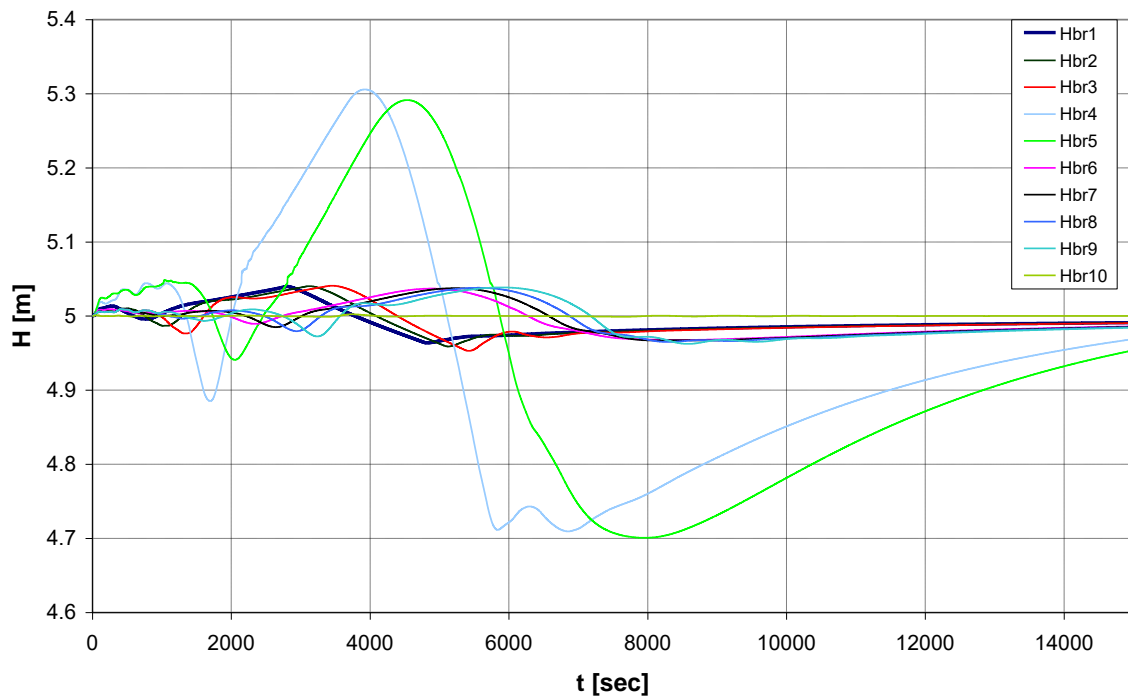
Табела 4. Вредности контролних параметара за каскадни систем

ХЕ	K_p	K_i	K_d	q_{ff}
1	100	0.001	0	да
2	100	0.001	0	да
3	100	0.001	0	да
4	10	0.001	0	да
5	10	0.001	0	да
6	100	0.001	0	да
7	100	0.001	0	да
8	100	0.001	0	да
9	100	0.001	0	да
10	200	10	0	да



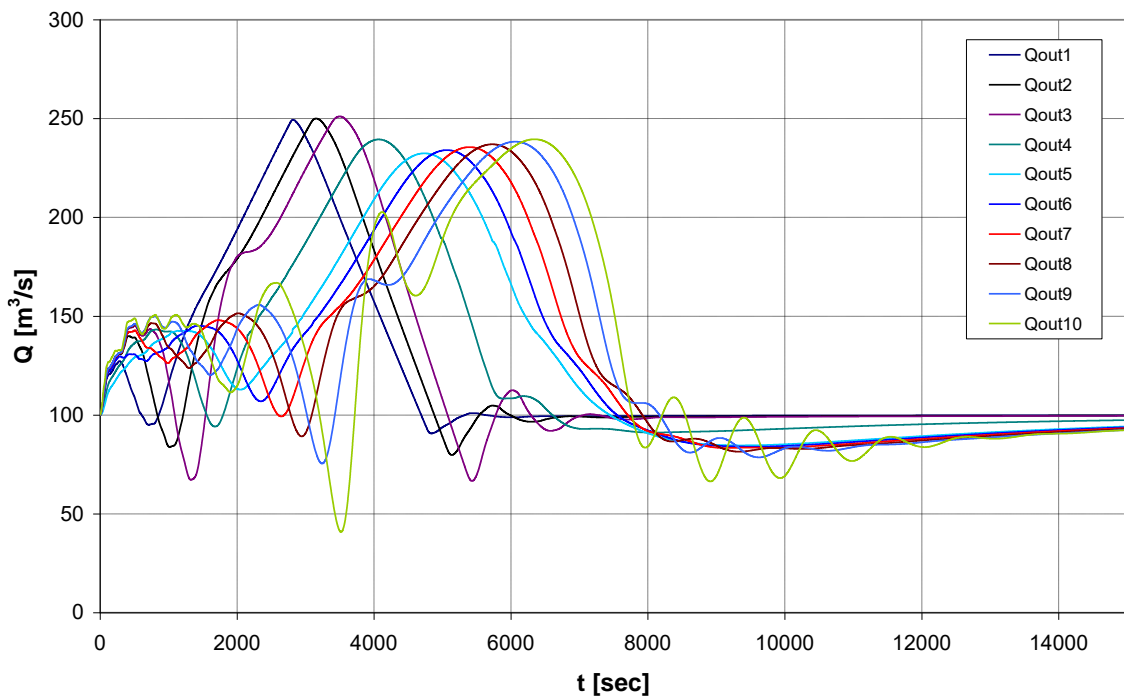
Слика 97. Вредност грешке на свакој од ХЕ

Nivo u preseku uz prelivni objekat



Слика 98. Ниво уз прелив за сваку од ХЕ

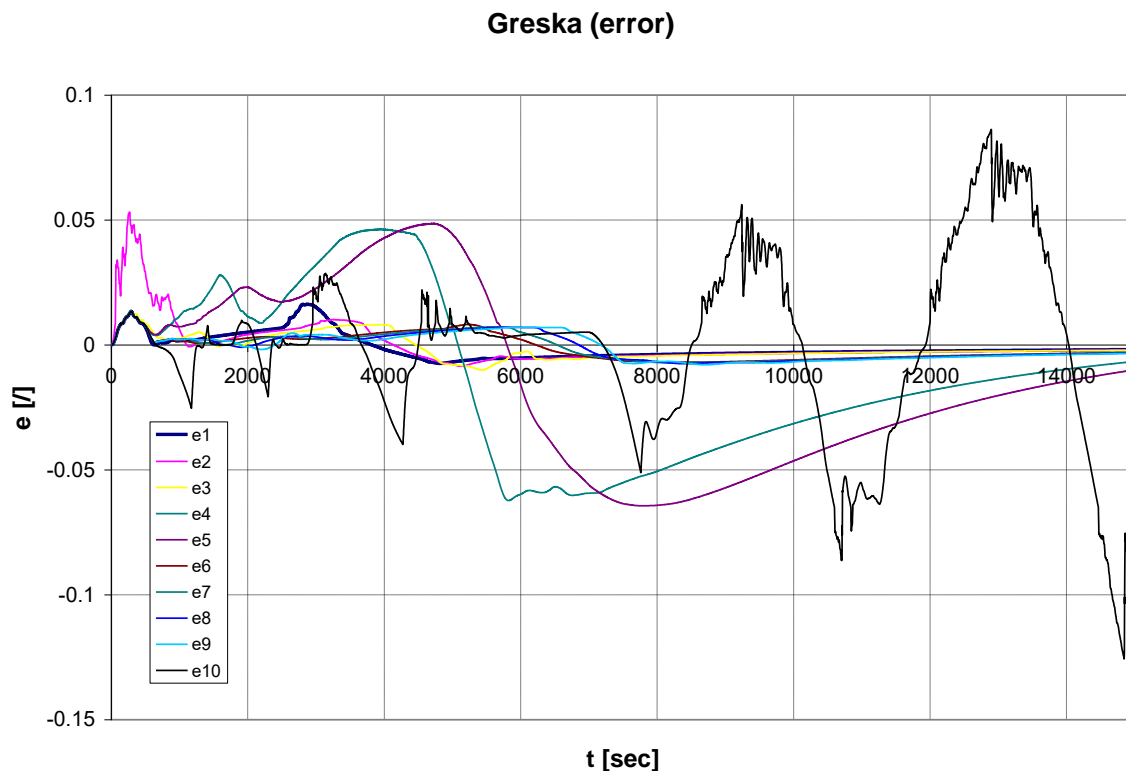
Izlazni hidrogrami



Слика 99. Излазни протоци за сваку од ХЕ

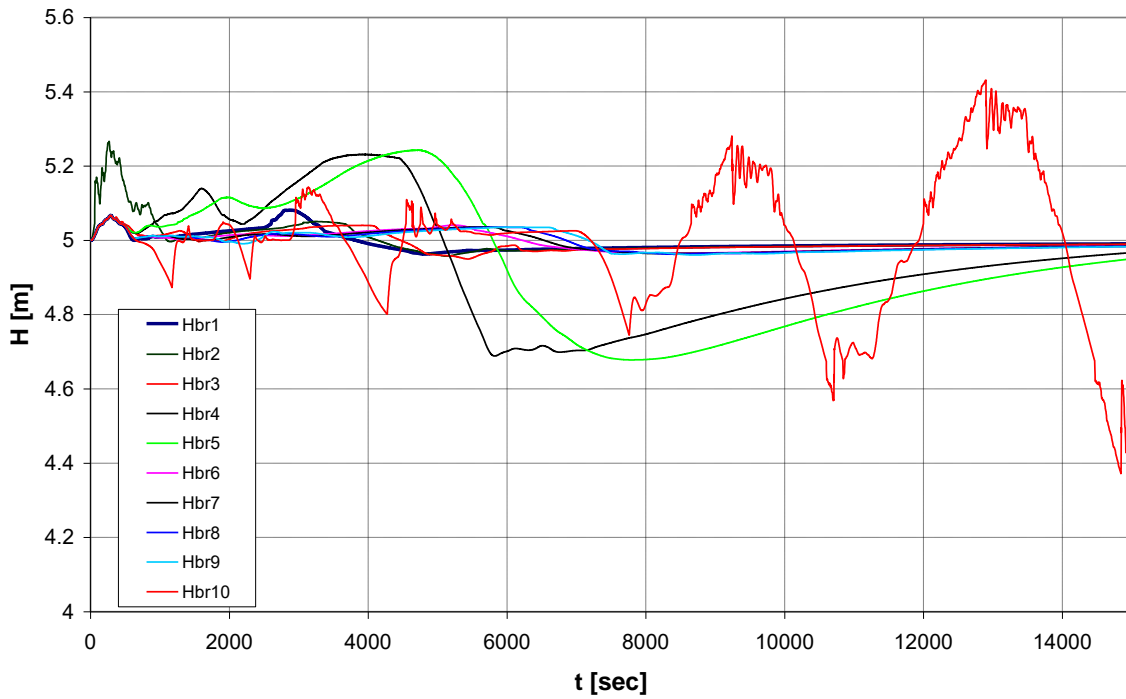
5.4 Резултати за модел приказан под 4.5

У моделу приказаном под 4.5 користе се исти параметри PID контроле као и за модел приказан под 4.4. Разлика је, као што је већ речено, у томе што је уведен блок који се односи на хидроелектрану и преливне објекте, чиме се уводи ограничење маневрисања у виду коначне вредности брзине спуштања/подизања преливних клапни. За све хидроелектране система тестирана је иста вредност брзине спуштања/подизања која износи $\omega=4,5 \text{ deg/min}$.



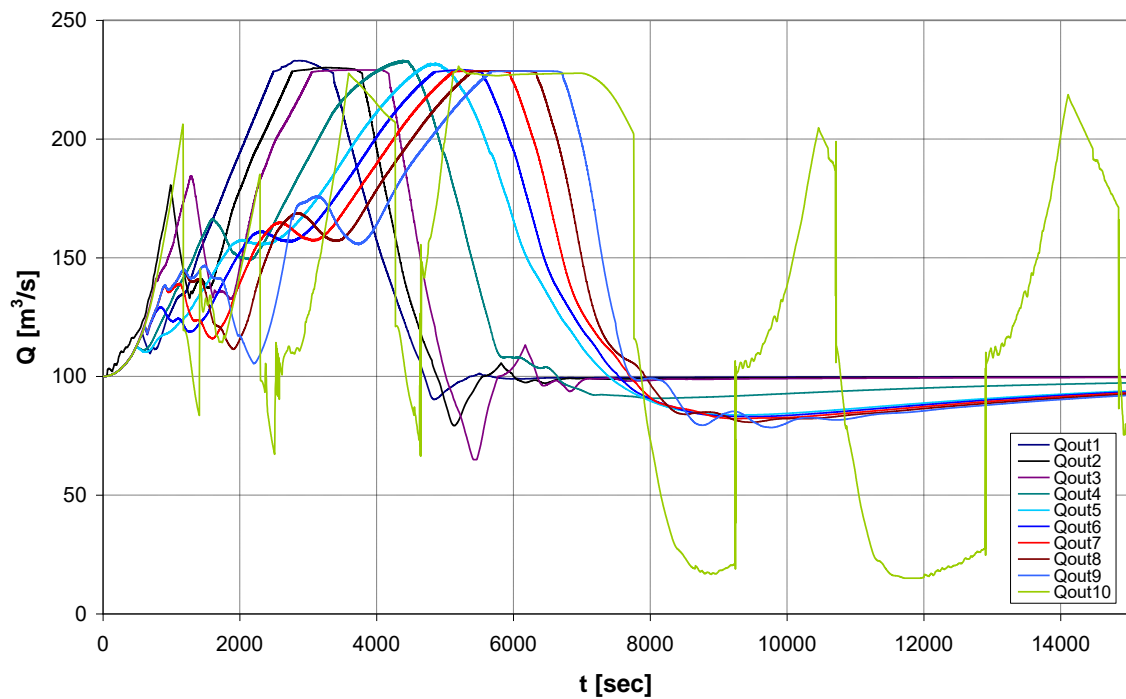
Слика 100. Грешка за сваку од хидроелектана у систему

Nivo u preseku uz prelivni objekat

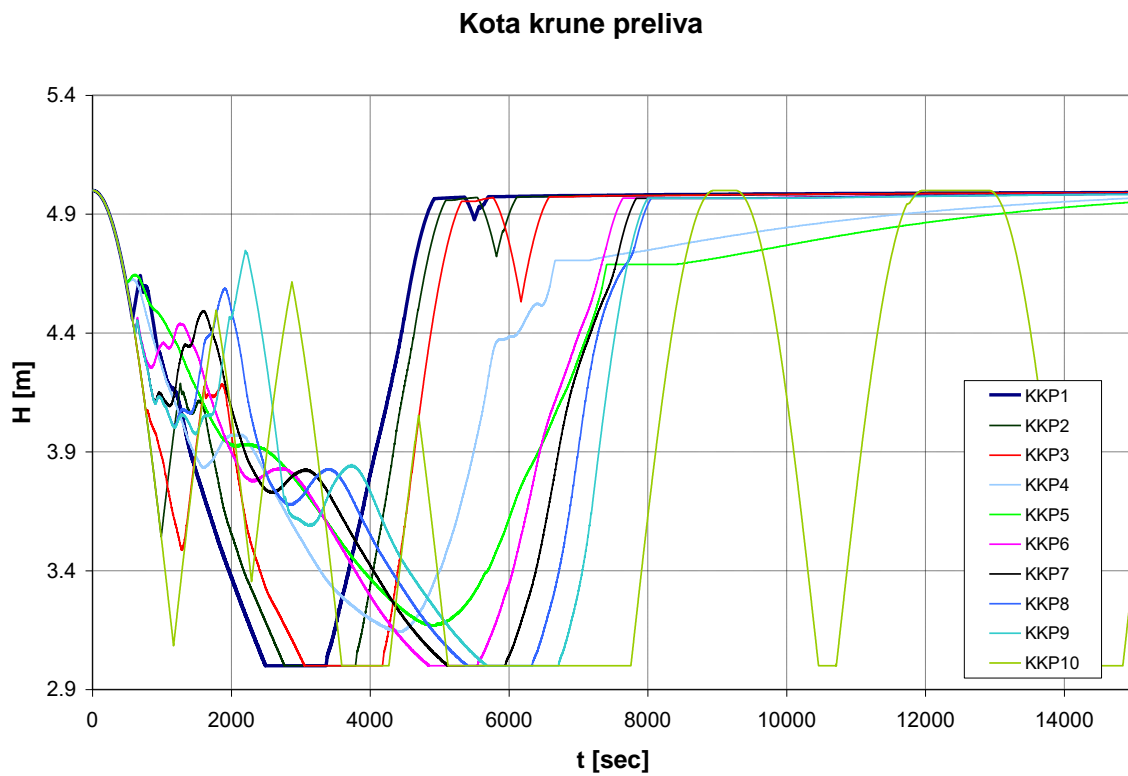


Слика 101. Ниво уз прелив за сваку од хидроелектана у систему

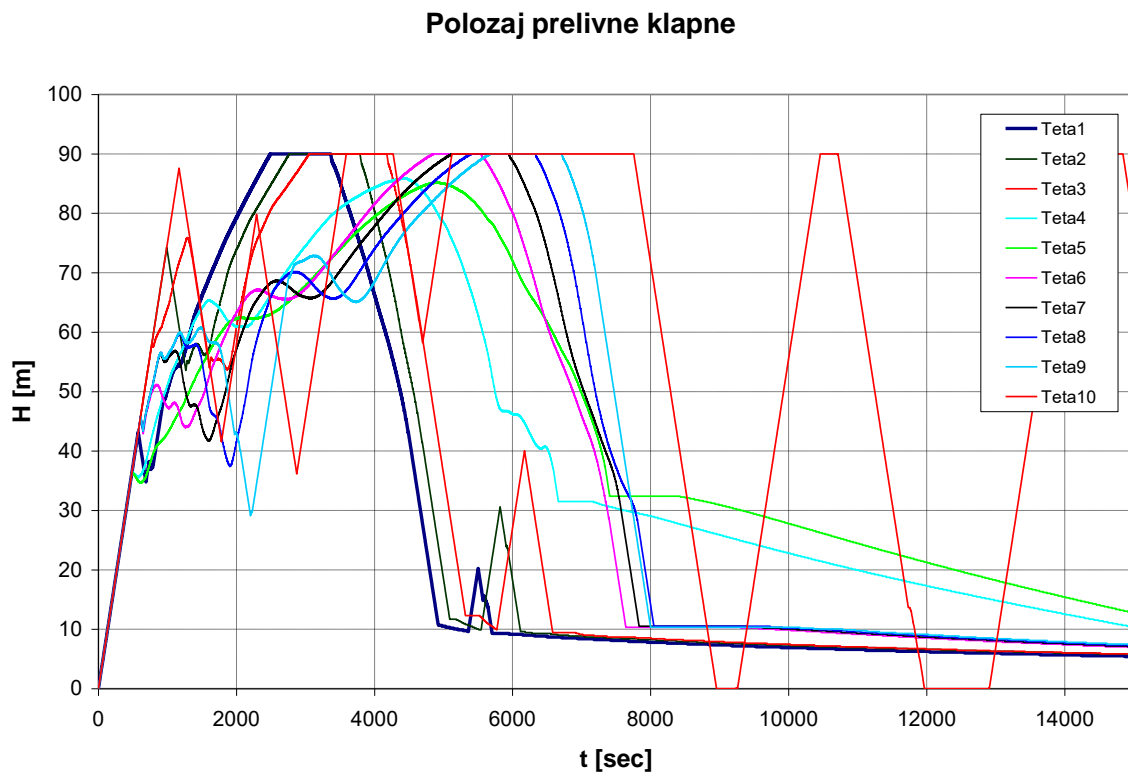
Izlazni hidrogrami



Слика 102. Излазни проток за сваку од хидроелектана у систему



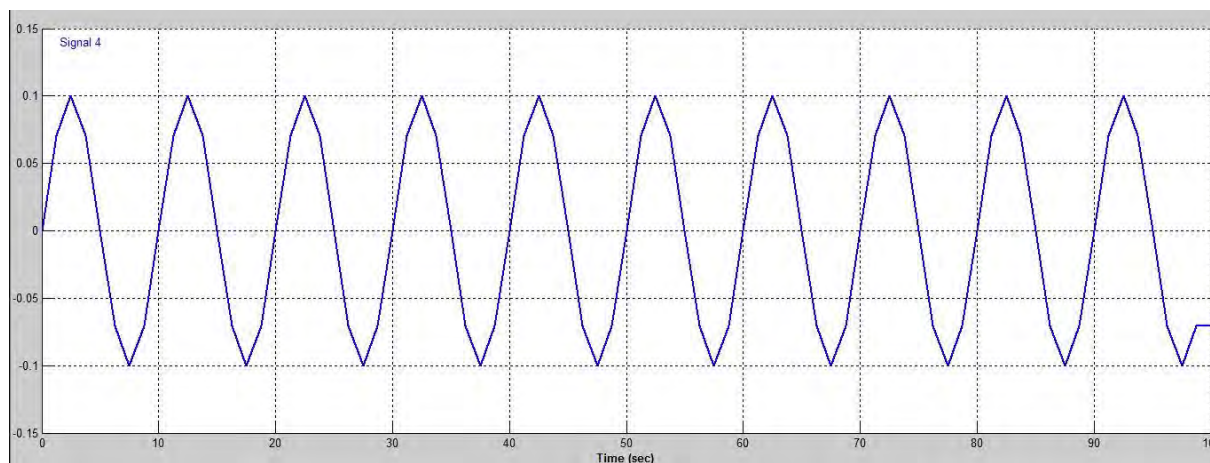
Слика 103. Кота круне прелива за сваку од хидроелектана у систему



Слика 104. Положај преливне клапне за сваку од хидроелектана у систему

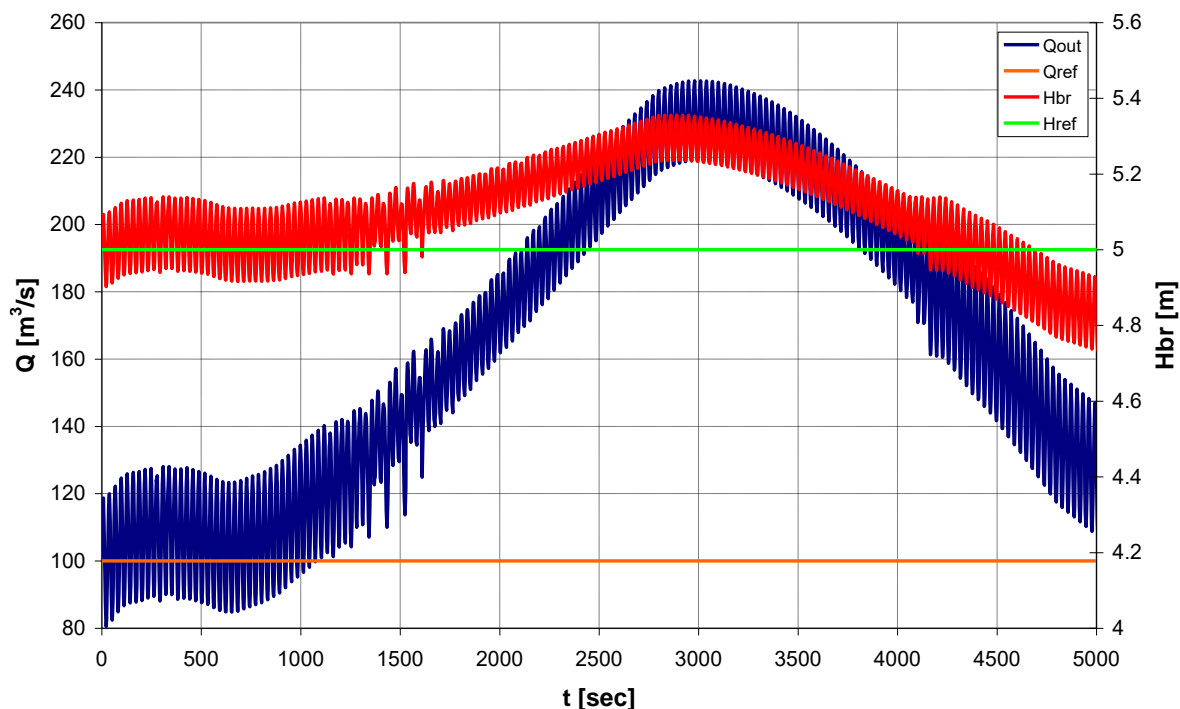
5.5 Резултати симулације са утицајем мерних грешака на рад PID контроле

За процену утицаја мерних грешака уводи се вештачки шум генерисан у облику синусоиде са фреквенцијом осциловања $f=0.0333$ Hz и амплитудом од 0.1 m. На тај начин покушана је приказивање мерних неизвесности које сами мерни уређаји за мерење нивоа поседују и какав би утицај имало на команде, тачније проток, које се добијају преко PID команде као и утицај на оно што је циљ, а то је одржавање нивоа у одређеним границама.



Слика 105. Вештачки генерисан шум

Nivo uz preliv i izlazni protok



Слика 106. Ниво уз прелив и излазни проток услед мерних грешака

На основу резултата који у обзир узимају и мерне грешке види се да се као потреба намеће филтрирање резултата јер прилагођавање ПИД контроле сигналу који у себи садржи шум не даје резултате који су одговарајући са становишта управљања нивоа.

6 Дискусија

Применом концептуалног модела управљања каскадним хидроенергетским системом, који је разрађен у оквиру подокружења Simulink, испитани су утицаји различитих подешавања контролних параметра како би се дао одговор на питање да ли је управљање једни таквим системом могуће уз различита ограничења.

Применом концепта PID контроле ХЕС је посматран као динамички систем који се одређеним поремећајем, у овом случају неким поплавним хидрограмом, побуђује на осциловање. Променом вредности контролних параметара PID контроле дошло се до неких вредности које би одступања од неких референтних вредности смањила на прихватљиву меру.

Сам концепт PID контроле подразумева да се систем не посматра само тренутно (пропорционална компонента), већ да је у обир потребно узети и стања система из претходног периода (интегративна компонента) као и да је у неким случајевима потребно предвидети како ће се систем понашати у наредном периоду на основу претходних података (деривативна компонента).

Применом концепта PID контроле која разматра само тренутне вредности осцилација (грешке), тачније само пропорционална компонента, види се да вредности нивоа, чијем што бољем управљању се тежи, имају већу амплитуду и и већу периоду осциловања у односу на случајеве када се користе интегративна и/или деривативна компонента. Због тога се увођење интегративне компоненте сматра готово неопходним, док увођење деривативне компоненте треба пажљиво размотрити, јер природа те компоненте (екстраполује нагиб грешке) може да повећа осцилације уместо да их смањи. Увођењем и компоненте која се односи на информацију саузводне хидроелектране, тзв. *feedforward*, осцилације нивоа се могу свести на практично занемарљиве вредности (пр. мање од 1 mm), што се може остварити уз добро подешене контролне параметре. Међутим, када је улаз у систем (улазни хидрограм) „разнолик“ а жеља је да излаз из система (ниво) буде са што мање промена, управљање мора такође бити „разнолико“, што за последицу има да управљање системо (излазни проток) може имати нагле промене које на низводној хидроелектрани може формирати такав поплавни талас који се не може „испеглати“ на начин на који се жели одржавати ниво, чак ни подешавањем контролних параметара. На тај начин потврђује се теза да субоптимално решење (на нивоу једне ХЕ) не доводи до оптималног решења целог система. Пример за то је модел представљен под 4.4 у коме је на неким хидроелектранама било потребно допустити веће осцилације, како у ниводним акумулацијама низводни талас не би изазвао нестабилност нумеричког модела.

Разматрани модели једне акумулације и каскадног система у којима се рад преливних објеката моделира математичким апаратом PID контроле, даје веома добре резултате са становишта услова који је постављен као одржавање нивоа. Проблем који се јавља је у томе што преливни објекти не могу у потпуности или не могу уопште да подрже команде добијене са PID контроле због фиичких ограничења која им намећу уређаји за њихово покретање. Због тога је било потребно одредити која је то брзина маневрисања која би могла да се што више прилагоди командама PID контроле и којом би ниво могао да се одржи у неким границама. Испитање су раличите вредности угаоних брзина при чему се дошло до резултата који говоре да је већа брзина боља у погледу прилагођавања командама PID контроле. Међутим, и тада постоји проблем, који се огледа у томе да је често потребно мењати смер ротације покретних преливних клапни, што није прихватљиво са становишта могућности покретачких уређаја. Мањим

брзинама добијају се значајније осцилације, али са нагласком да су оне значајније у односу на веће вредности брзине, што не мора унапред да значи да су резултати незадовољавајући, напротив.

У наредној табели могуће је видети колике су вредности амплитуда нивоа за случај када се каскадни систем моделира само PID контролом као моделом преливних објеката:

Табела 5. Амплитуде нивоа на свим хидроелектранама

ХЕ	K_p	K_i	K_d	q_{ff}	ΔH_{max} [cm]
1	100	0.001	0	да	4
2	100	0.001	0	да	4
3	100	0.001	0	да	4.5
4	10	0.001	0	да	30
5	10	0.001	0	да	30
6	100	0.001	0	да	3.5
7	100	0.001	0	да	4
8	100	0.001	0	да	4
9	100	0.001	0	да	4
10	200	10	0	да	0.25

За други случај, када се уводи и модел хидроелектране, одступања од референтног нивоа су већа него у претходном случају.

Табела 6. Амплитуде нивоа на свим хидроелектранама $\omega=4.5$ deg/min

ХЕ	K_p	K_i	K_d	q_{ff}	ΔH_{max} [cm]
1	100	0.001	0	да	8
2	100	0.001	0	да	27
3	100	0.001	0	да	7
4	10	0.001	0	да	30
5	10	0.001	0	да	30
6	100	0.001	0	да	7
7	100	0.001	0	да	7
8	100	0.001	0	да	7
9	100	0.001	0	да	7
10	200	10	0	да	60

Додатним подешавањем контролних параметара, у чије се детаљисање није зашло у мери у којој би можда требало (циљ је пре свега приказати њихов утицај), могло би се доћи до још бољих резултата, за шта би вероватно требало употребити и неке оптимизиционе алгоритме.

7 Закључци

Искоришћење хидроенергетског потенцијала појединих река у Србији које немају могућност формирања великих акумулација, намеће решење у виду каскадних хидроенергетских система са проточним хидроелектранама. Као веома скупи и готово увек на граници исплативости, каскадни ХЕС, који енергетску производњу заснивају на тренутним вредностима протока и нивоа, захтевају правилно управљање пре свега у циљу одржавања нивоа.

Може се видети да је испитивани алгоритам управљања нивоом у различитим случајевима доводио до задовољавајућих резултата са становишта одржавања нивоа непосредно уз преградни објекат. Оно што се намеће као проблем у управљању нивоом јесу ограничене маневарске способности преливних објеката, што доводи до успоравања процеса устаљивања нивоа, односно до већих осцилација. Због тога је потребно пажљиво одредити вредности контролних параметара и покушати да се маневри преливних објеката што више прилагоде тим параметрима. Због тога је потребно даље разрадити предложени алгоритам управљања.

Као неке од тема наредних истраживања повезаних са овим проблемом намећу се истраживања о оптимизацији управљања оваквим системом са становишта максимизације енергетске производње и заштите приобаља, побољшање модела преносом информација о управљању са једне хидроелектране на више низводних, за разлику од модела описаног у овом раду који преноси информације само на суседну хидроелектрану, подесавање маневара преливних објеката у циљу што бољег прилагодјавања PID контроли итд.

Напомиње се да се резултати добијени применом предложеног алгоритма односе се на апроксимирану геометрију акумулација, чиме се уноси значајна грешка у модел који може послужити за анализу управљања хидроенергетским системима на нижим нивоима пројектовања, док би се за детаљније и тачније управљање морала користити природна геометрија.

Литература

1. Иветић Д., (2015), *Управљање преливним објектима каскадног ХЕС Западна Морава*, Грађевински факултет, Београд, Србија
2. Gullhamn E., (2004), *Control of water content and retention in hydropower plant cascades*, KTH Signals Sensors and Systems, Stockholm, Sweden
3. Astrom K. J., (2002), *Control System Design*, University of California, Santa Barbara.
4. Ђорђевић Б., (2001), *Хидроенергетско коришћење вода*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија
5. Foo M., Ooi S. K., Weyer E., (2013), *Centralised and decentralised control of the Broken river*, European control conference, Zurich, Switzerland
6. Hartmut L., Eckhard A., (2002), *Model based predictive control of river reservoirs*, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain
7. Rantz S. E. And others, (1982), *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of discharge*, United States Government Printing Office, Washington, USA
8. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Завод за бране, хидроенергетику, руднике и саобраћајнице, (2010), *Хидроелектране на Ибру – генерални пројекат*, Београд, Србија
9. Електропривреда Србије, (2011), *Извештај за 2011. годину*, Београд, Србија
10. Продановић Д., (2010), *Скрипта са предавања (радни материјал) – мерења у хидротехници*, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Београд, Србија
11. Ziegler J. G., Nichols N.B. (1941), *Optimum Settings for Automatic Controllers*, The American Society of Mechanical engineers, New York, USA