



Robert Brezovnik

# **KRATKOROČNA OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN**

Diplomsko delo

Maribor, februar 2009





Diplomska naloga univerzitetnega študijskega programa

## **KRATKOROČNA OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN**

Študent: Robert BREZOVNIK  
Študijski program: univerzitetni, Elektrotehnika  
Smer: Močnostna elektrotehnika

Mentor: red. prof. dr. Drago DOLINAR  
Somentor: doc. dr. Boštjan POLAJŽER

Maribor, februar 2009





# FERI

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko  
Smetanova 17, 2000 Maribor

Številka: E-2536

Datum in kraj: 07. 01. 2009, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 32/2008)

## SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

1. **Robertu Brezovniku**, študentu univerzitetnega študijskega programa Elektrotehnika, smer Močnostna elektrotehnika, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu Avtomatizacija v energetiki.
2. **MENTOR:** red. prof. dr. Drago Dolinar  
**SOMENTOR:** doc. dr. Boštjan Polajžer
3. **Naslov diplomskega dela:**  
**KRATKOROČNA OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN**
4. **Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**  
**SHORT TERM OPTIMIZATION OF DRAVA RIVER HYDRO POWER PLANTS OPERATION**
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 07. 01. 2010 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Zu Dekan:

  
\_\_\_\_\_



Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti arhiv.



**ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Dragu Dolinarju in somentorju doc. dr. Boštjanu Polajžerju za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi g. Andreju Steinbachu in g. Jerneju Brglezu s podjetja Holding Slovenske elektrarne, ter g. Marjanu Kirbišu in g. Dragu Taljanu s podjetja Dravske elektrarne Maribor, ki so priskrbeli vse potrebne podatke za pripravo diplomskega dela.





## KRATKOROČNA OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN

**Ključne besede:** kratkoročna optimizacija, hidroelektrarna, bazen, obratovalni diagram, model, genetski algoritem

**UDK:** 681.51.015:621.311.21(043.2)

### **Povzetek**

*V delu je predstavljena kratkoročna optimizacija obratovanja verige Dravskih elektrarn. Optimizacija temelji na genetskem algoritmu, ki je del programskega paketa MATLAB. Predstavljeni so postopki modeliranja hidroelektrarn in bazenov. Uporabljeni so nelinearni modeli hidroelektrarn in dinamični modeli bazenov. Parametri dinamičnih bazenov so določeni na podlagi izmerjenih vrednosti pretokov in nivojev vode v bazenih. Za model verige dravskih elektrarn so prikazane primerjave med izmerjenimi in izračunanimi časovnimi odzivi nivojev vode v bazenih. Z analizo izmerjenih vrednosti moči v obdobju enega leta je bilo zmanjšano število možnih rešitev optimizacije. Časovno obdobje optimiranja je omejeno na največ 24 ur.*

## SHORT TERM OPTIMIZATION OF DRAVA RIVER HYDRO POWER PLANTS OPERATION

**Key words:** short term optimization, hydro power station, basin, workflow, model, genetic algorithm

**UDK:** 681.51.015:621.311.21(043.2)

### **Abstract**

*This work presents short term optimization of Drava river hydro power plants operation. Optimization is based on genetic algorithm, which is part of MATLAB software package. Modeling of hydro power plants and basins is presented. Nonlinear models of hydro power plants and dynamic basins are used. Parameters of dynamical basin models are obtained on measured values of flows and water levels. Calculated and measured time responses of basin water levels are compared for entire chain of Drava river hydro power plants. A mathematical analysis of measured powers within one year operation periode is used to reduce the possible solutions of optimization. Period of optimization calculations is limited to maximum of 24 hours.*

## VSEBINA

<b>VSEBINA</b> .....	<b>XI</b>
<b>SEZNAM SLIK</b> .....	<b>XII</b>
<b>SEZNAM TABEL</b> .....	<b>XIII</b>
<b>UPORABLJENI SIMBOLI</b> .....	<b>XIV</b>
<b>UPORABLJENE KRATICE</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREDSTAVITEV ZAHTEVNOSTI ZASTAVLJENE NALOGE</b> .....	<b>3</b>
2.1 ŠTEVILO SPREMENLJIVK .....	4
2.2 OCENA ŠTEVILA POTENCIALNIH MOŽNIH REŠITEV OPTIMIZACIJE .....	6
<b>3. MODELIRANJE VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN</b> .....	<b>12</b>
3.1 MODELIRANJE HIDROELEKTRARN.....	14
3.2 MODELIRANJE BAZENOV .....	22
3.3 MODELIRANJE VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN .....	31
3.4 VERIFIKACIJA MODELA VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN .....	33
<b>4. PRIPRAVA VHODNIH PODATKOV ZA OPTIMIZACIJO</b> .....	<b>41</b>
4.1 DOLOČITEV ŠTEVILA SPREMENLJIVK.....	45
4.2 DOLOČITEV OMEJITVE SPREMENLJIVK .....	47
4.3 NORMIRANJE SPREMENLJIVK.....	52
<b>5. OSNOVNI PRINCIP OPTIMIZACIJE</b> .....	<b>54</b>
5.1 GENETSKI ALGORITEM .....	54
5.2 OCENITVENA FUNKCIJA.....	56
5.3 KOREKCIJA MOČI HE .....	62
5.3.1 Enakomerna razporeditev presežka oziroma primanjkljaja moči.....	64
5.3.2 Razporeditev presežka oz. primanjkljaja moči glede na obremenitev HE .....	64
<b>6. PREIZKUŠANJE OPTIMIZACIJE</b> .....	<b>66</b>
<b>7. SKLEP</b> .....	<b>73</b>
<b>8. VIRI, LITERATURA</b> .....	<b>75</b>

## SEZNAM SLIK

SLIKA 2.1: PRIMERJAVA MINIMALNIH IN MAKSIMALNIH MOČI POSAMEZNIH HE.....	7
SLIKA 2.2: PRETVORBA ZVEZNEGA V DISKRETNO PODROČJE .....	7
SLIKA 2.3: HISTOGRAM ŠTEVILA RAZLIČNIH KOMBINACIJ, S KATERIMI LAHKO DOSEŽEMO POSAMEZNO SKUPNO MOČ VERIGE DEM (VEČKRATNIKI ŠTEVILA 5) .....	9
SLIKA 3.1: BAZEN HE FALA S ŠTEVILNIMI LOKALNIMI PRITOKI.....	13
SLIKA 3.2: POVEČANJE NIVOJA VODE V BAZENU HE VUZENICA ZARADI LOKALNIH DOTOKOV.....	13
SLIKA 3.3: SHEMATSKI PRIKAZ HE .....	14
SLIKA 3.4: VEČAGREGATNI IN ENOAGREGATNI MODEL HIDROELEKTRARNE.....	17
SLIKA 3.5: PRETOČNA KARAKTERISTIKA AGREGATA HE DRAVOGRAD .....	18
SLIKA 3.6: PRETOČNA KARAKTERISTIKA ENEGA AGREGATA (ČRNA PLOSKEV) IN PRETOČNA KARAKTERISTIKA DVEH AGREGATOV (BARVNA PLOSKEV) .....	18
SLIKA 3.7: PRETOČNA KARAKTERISTIKA ENEGA (RDEČA), DVEH (ČRNA) IN TREH AGREGATOV (BARVNA) .....	19
SLIKA 3.8: PODROČJA OBRATOVANJA HE DRAVOGRAD Z ENIM (ZELENA), DVEMA (MODRA) ALI TREMI AGREGATI (RJAVA).....	20
SLIKA 3.9: PRETOČNA KARAKTERISTIKA HE ENOAGREGATNEGA MODELA HE .....	21
SLIKA 3.10: PRETOČNA KARAKTERISTIKA HE DRAVOGRAD Z IZMERJENIMI DELOVNIMI TOČKAMI, KI PREDSTAVLJAJO URNA POVPREČJA V ČASOVNEM OBDOBJU ENEGA LETA .....	22
SLIKA 3.11: UPAD VODE NA KONCU BAZENA PRI POVEČANEM ODTOKU.....	23
SLIKA 3.12: DVIG VODE OB ELEKTRARNI PRI ZMANJŠANJU ODTOKA VODE .....	23
SLIKA 3.13: POLNI BAZEN Z VODNIM KLINOM.....	24
SLIKA 3.14: TRIJE ZAPOREDNO VEZANI DELI BAZENA S POVEZOVALNIMI ELEMENTI.....	25
SLIKA 3.15: PONAZORITEV BAZENA Z ELEKTRIČNIM VEZJEM.....	26
SLIKA 3.16: PRESEK REČNE STRUGE S SPREMENLJIVO POVRŠINO VODE .....	27
SLIKA 3.17: BLOKOVNA SHEMA DINAMIČNEGA MODELA BAZENA S TREMI DELI.....	27
SLIKA 3.18: IZMERJENE VREDNOSTI PRITOKA, ODTOKA TER NIVOJA VODE V BAZENU HE OŽBALT .....	29
SLIKA 3.19: POTEKI IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH NIVOJEV VODE V BAZENU HE OŽBALT .....	30
SLIKA 3.20: BLOKOVNA SHEMA HE VUZENICA .....	32
SLIKA 3.21: VERIGA HIDROELEKTRARN.....	33
SLIKA 3.22: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE DRAVOGRAD.....	35
SLIKA 3.23: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE VUZENICA .....	35
SLIKA 3.24: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE VUHRED .....	36
SLIKA 3.25: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE OŽBALT.....	36
SLIKA 3.26: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE FALA .....	37
SLIKA 3.27: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE MARIBORSKI OTOK .....	37
SLIKA 3.28: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE ZLATOLIČJE.....	38
SLIKA 3.29: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH KOLIČIN BAZENA HE FORMIN .....	38
SLIKA 4.1: NIHANJE NIVOJA VODE V BAZENU HE VUZENICA V ČASU NEOBRATOVANJA HE.....	42
SLIKA 4.2: MINIMALNE, MAKSIMALNE IN SREDNJE VREDNOSTI MOČI ZNOTRAJ POSAMEZNIH OBMOČIJ .....	48
SLIKA 4.3: MINIMALNE, MAKSIMALNE IN SREDNJE VREDNOSTI MOČI ZNOTRAJ POSAMEZNIH OBMOČIJ .....	49
SLIKA 4.4: OMEJITVE MAKSIMALNIH IN MINIMALNIH MOČI HE .....	51
SLIKA 4.5: OMEJITVE MAKSIMALNIH IN MINIMALNIH MOČI HE .....	51
SLIKA 4.6: RAZPON MOČI HE Z NEDOVOLJENIM STANJEM MED $P = 0$ IN $P_{\text{MIN}}$ .....	52
SLIKA 4.7: PRESLIKAVA PODROČJA OBRATOVANJA HE NA NOVO PODROČJE .....	52
SLIKA 5.1: BLOKOVNA SHEMA GENETSKEGA ALGORITMA .....	55
SLIKA 5.2: BLOKOVNA SHEMA OCENITVENE FUNKCIJE .....	60

SLIKA 6.1: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE DRAVOGRAD.....	68
SLIKA 6.2: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE VUZENICA.....	68
SLIKA 6.3: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE VUHRED.....	69
SLIKA 6.4: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE OŽBALT .....	69
SLIKA 6.5: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE FALA.....	70
SLIKA 6.6: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE MARIBORSKI OTOK .....	70
SLIKA 6.7: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE ZLATOLIČJE .....	71
SLIKA 6.8: ČASOVNI POTEKI SPREMENLJIVK HE IN BAZENA HE FORMIN.....	71

## SEZNAM TABEL

TABELA 2.1: PRIMER OBRATOVALNEGA DIAGRAMA VERIGE DEM .....	4
TABELA 2.2: PRIMER OBRATOVALNEGA DIAGRAMA (LEVO) IN POTREBNA RAZPOREDITEV MOČI (DESNO).....	5
TABELA 2.3: TABELA MINIMALNIH IN MAKSIMALNIH MOČI, TER MOČI NA PRAGU ELEKTRARN .....	6
TABELA 2.4: ŠTEVILO RAZLIČNIH MOČI, KI JIH LAHKO TVORI POSAMEZNA HE PRI $\Delta P = 1$ MW .....	8
TABELA 2.5: OBRATOVALNI DIAGRAM Z ZAOKROŽENIMI MOČMI NA VEČKRATNIKE ŠTEVILA PET.....	10
TABELA 2.6: ŠTEVILO MOŽNIH KOMBINACIJ, S KATERIM LAHKO ZAGOTOVIMO POSAMEZNO SKUPNO MOČ VERIGE DEM.....	10
TABELA 3.1: ENAKA SKUPNA MOČ HE DRAVOGRAD Z RAZLIČNIMA VREDNOSTIMA SKUPNEGA PRETOKA.....	15
TABELA 3.2: POVRŠINE BAZENOV IN KANALOV.....	25
TABELA 4.1: ODVISNOST ŠTEVILA SPREMENLJIVK OD ŽELENE VREDNOSTI MOČI V OBDOBJU ENE URE.....	46
TABELA 5.1: PRIMER DELA OBRATOVALNEGA DIAGRAMA S 15 MINUTNIM ČASOVNIM KORAKOM.....	59
TABELA 6.1: ZAČETNI POGOJI OPTIMIZACIJE .....	66
TABELA 6.2: TABELA PREDVIDENIH PRETOKOV AVSTRIJSKE HE LABOT .....	66
TABELA 6.3: TABELA SKUPNIH ŽELENIH MOČI .....	67
TABELA 6.4: REZULTATI OPTIMIZACIJE.....	67

## UPORABLJENI SIMBOLI

$P_{\min}$  – minimalna moč hidroelektrarne

$P_{\max}$  – maksimalna moč hidroelektrarne

$P_{\text{sk,HE}}$  – skupna moč ene hidroelektrarne, ki je vsota moči vseh agregatov

$P_{\text{sk}}$  – skupna moč vseh hidroelektrarn

$Q_{\text{sk}}$  – skupni pretok hidroelektrarne

H – padec vode

## UPORABLJENE KRATICE

HE – hidroelektrarna

DEM – Dravske elektrarne Maribor

DRAV – HE Dravograd

VUZ – HE Vuzenica

VUH – HE Vuhred

OZB – HE Ožbalt

FAL – HE Fala

MO – HE Mariborski otok

ZLAT – HE Zlatoličje

FOR – HE Formin

VAM – večagregatni model hidroelektrarne

EAM – enoagregatni model hidroelektrarne

GA – genetski algoritem







## 1. UVOD

Hidroelektrarne (HE) predstavljajo enega najčistejših in najcenejših virov pridobivanja električne energije, ki zagotavljajo kar 27 % celotne proizvedene električne energije v Sloveniji. V nasprotju z nuklearnimi elektrarnami, ki večino časa delujejo v pasu, HE v sodelovanju s termoelektarnami pokrivajo vršni del potrebe po električni energiji. Sposobnost pokrivanja vršnih potreb električne energije je predvsem posledica akumulacijskih sposobnosti slovenskih HE, ki v času manjše porabe električne energije nabirajo vodo v akumulacijskih bazenih in nato v času največjih potreb proizvajajo električno energijo. Hidrološke razmere v Sloveniji zaradi malih pretokov rek ne dopuščajo trajnega obratovanja HE. Ker HE omogočajo zelo hiter zagon in zaustavitev proizvodnje električne energije v primerjavi s termoelektarnami, le te prevzamejo velik delež potrebne moči za sekundarno regulacijo, s katero se uravnava trenutne primanjkljaje ali presežke električne energije na trgu. Tesno sodelovanje HE in termoelektarn pri proizvodnji električne energije, daje HE pomembno dodatno vrednost. Z optimalnim obratovanjem HE, ki imajo zanemarljivo male stroške obratovanja, lahko zmanjšamo porabo goriva termoelektarn in s tem visoke stroške obratovanja, prav tako pa se zmanjša obremenitev okolja s strupenimi snovmi. Pravkar omenjeno pa pomeni, da dobi vsak kubični meter vode v akumulacijskih bazenih svojo vrednost, ki se v času globalnega segrevanja samo še povečuje.

Optimalno obratovanje verige dravskih elektrarn (DEM) predstavlja osnovno temo tega diplomskega dela. S kratkoročno optimizacijo obratovanja verige DEM želimo doseči maksimalni izkoristek akumulirane vode v bazenih elektrarn. Pri kratkoročnem načrtovanju obratovanja verige DEM za naslednjih 24 ur se srečujemo predvsem z dvema glavnima vprašanjima. Prvo vprašanje je vezano na zmožnost zagotavljanja predvidenega obratovalnega diagrama celotne verige DEM, ki ga sistemski operater pripravi za naslednji dan obratovanja. Drugo vprašanje pa je vezano na razporeditev moči po elektrarnah. Če je

predvideni obratovalni diagram možno doseči s trenutnimi akumulacijami vode in predvidenimi dotoki v naslednjih 24 urah, je potrebno določiti obratovalne diagrame za posamezne HE. Z optimalno razporeditvijo moči po udeleženi HE, želimo čim boljše izkoristiti akumulirano vodo in si hkrati zagotoviti najboljše začetne pogoje za obratovanje HE v naslednjih 24 urah.

Na trgu obstajajo različni komercialni programi za optimizacijo obratovanja verig HE, ki delujejo na precej poenostavljenih linearnih modelih HE in bazenov. Optimiranje obratovanja verige HE s takšnimi poenostavljenimi modeli je možno le v primeru velikih HE z zelo velikimi akumulacijskimi jezeri, pri katerih se prostornine in z njimi povezani padci vode s časom le malo spreminjajo. V primeru DEM pa imamo opravka z relativno malimi dnevnimi akumulacijami vode, pri katerih je opazna velika dinamika prostornin vode v bazenih in s tem povezano nenehno spreminjanje padca vode. V takšnih razmerah optimizacija s poenostavljenimi modeli ni primerna, saj so odstopanja od dejanskih razmer prevelika in s tem rezultati optimizacije neuporabni.

Zgoraj našteje pomanjkljivosti komercialnih optimizacijskih programov so pomenile glavno motivacijo za študij in izvedbo kratkoročnega optimiranja obratovanja verige DEM, ki temelji na natančnem nelinearnem modelu HE in dinamičnem modelu akumulacijskih bazenov. Optimizacija temelji na globalni optimizacijski metodi z uporabo genetskega algoritma.

Diplomsko delo je sestavljeno iz šestih poglavij. Prvo poglavje je kratek uvod v katerem je predstavljena vsebina diplomskega dela. V drugem poglavju je predstavljena numerična zahtevnost zastavljene naloge. Tretje poglavje podaja postopek modeliranja verige dravskih elektrarn, pri tem je večji poudarek na modeliranju hidroelektrarn in bazenov. V četrtem poglavju so opisani postopki priprave vhodnih podatkov optimizacije in modela. V petem poglavju je podan osnovni princip optimizacije. V zadnjem šestem poglavju so podani rezultati optimizacije.

## 2. PREDSTAVITEV ZAHTEVNOSTI ZASTAVLJENE NALOGE

Že uvodoma je bilo omenjeno, da uporabljajo komercialni optimizacijski programi načrtovanja proizvodnje HE predvsem poenostavljene linearizirane modele HE in povezanih bazenov. To je največkrat posledica zahtev uporabljenih optimizacijskih metod, ki so sposobne reševati zgolj tako imenovane linearne ali kvadratične probleme, pri katerih so namenske in omejitvene funkcije linearne ali kvadratične. Zaradi uporabe teh optimizacijskih metod, ki so sicer sposobne reševati zelo kompleksne probleme z več deset tisoč spremenljivkami in se pogosto ter čedalje več uporabljajo v novejših komercialnih optimizacijskih programih, je potrebno model HE in bazenov zapisati v obliki linearnih in kvadratičnih funkcij in omejitev. To seveda pomeni linearizacijo nelinearnega modela in s tem povezano poenostavitev modela.

Veriga DEM predstavlja s svojimi relativno malimi akumulacijami zelo občutljiv dinamični sistem povezanih posod, katerih obnašanje lahko dovolj dobro opišemo zgolj z nelinearnimi modeli HE in njihovimi bazeni. Zaradi omenjenega smo se odločili narediti kratkoročno optimizacijo obratovanja na podlagi nelinearnega modela verige DEM. Zaradi uporabe kompleksnega nelinearnega modela pa se poveča čas izračuna takšnega modela. Zato je bilo potrebno sestaviti takšen nelinearni model verige DEM, ki bo v primeru spreminjanja pretokov HE dovolj dobro opisal dejansko obnašanje nivojev vode na začetku in na koncu bazenov (sprememba padca vode) in hkrati omogočal zelo hiter izračun optimizacije. S strani planerjev na DEM namreč prihaja zahteva po čim krajšem času izračuna optimizacije, ki naj ne presega časovnega okvirja od 5 do največ 10 minut. Daljši čas izračuna optimizacije je za planerje nesprejemljiv, saj morajo le ti v nekaj minutah odgovoriti sistemskemu operaterju ali je DEM sposoben zagotoviti dodatno električno energijo. Zahteva po zelo kratkem času izračuna optimizacije predstavlja eno izmed treh velikih težav, s katero smo se ukvarjali pri izdelavi optimizacijskega programa. Ostali dve težavi sta predstavljali veliko število spremenljivk in izredno veliko število potencialnih

možnih rešitev optimizacije. Obe bosta zaradi pomembnosti predstavljeni v dveh posebnih poglavjih.

## 2.1 Število spremenljivk

V primeru kratkoročne optimizacije obratovanja verige DEM smo se omejili na največ 24 ur obratovanja. To je posledica 24 urnega obratovalnega diagrama, ki ga pripravi sistemski operater za naslednjih 24 ur. Sistemski operater običajno posreduje omenjeni obratovalni diagram DEM 12 ur pred pričetkom obratovanja, oziroma pred naslednjim dnem. V obratovalnem diagramu je za vsako uro posebej določeno kolikšna naj bo skupna moč vseh HE, podobno kot je predstavljeno v tabeli 2.1.

Tabela 2.1: Primer obratovalnega diagrama verige DEM

Ura	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
Moč (MW)	0	0	0	0	0	0	75	242	453	372	478	499
Ura	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Moč (MW)	448	240	326	336	322	293	336	473	509	229	58	6

Za posamezno uro obratovanja želimo s pomočjo optimizacije določiti optimalno razporeditev zelene moči po posameznih HE, oziroma določiti želimo obratovalni diagram posamezne HE. Ker sestavlja verigo dravskih elektrarn 8 HE in ker smo se omejili na čas obratovanja 24 ur, nam to v najbolj neugodnem primeru predstavlja optimizacijo s 192 spremenljivkami (število ur množeno s številom HE). Prav mogoče namreč je, da obratuje vsako uro vseh osem HE, kar je s strani optimizacije najbolj neugodno. Vendar, kot je razvidno s tabele 2.1, so v prvih šestih urah zelene moči HE na DEM enake nič, kar je običajno ni pa nujno. V tem primeru imamo samo 144 spremenljivk, vendar jih je v resnici še manj, saj v primeru male zelene moči ne obratuje vseh osem HE.

V tabeli 2.2 je na levi strani prikazan primer obratovalnega diagrama, ki predvideva zelene skupne moči verige DEM za vsako posamezno uro. Na desni strani tabele so prikazani obratovalni diagrami posamezne HE, ki jih želimo določiti z optimizacijo. Kadar je skupna zelena moč DEM za posamezno uro enaka nič, so tudi moči posameznih HE



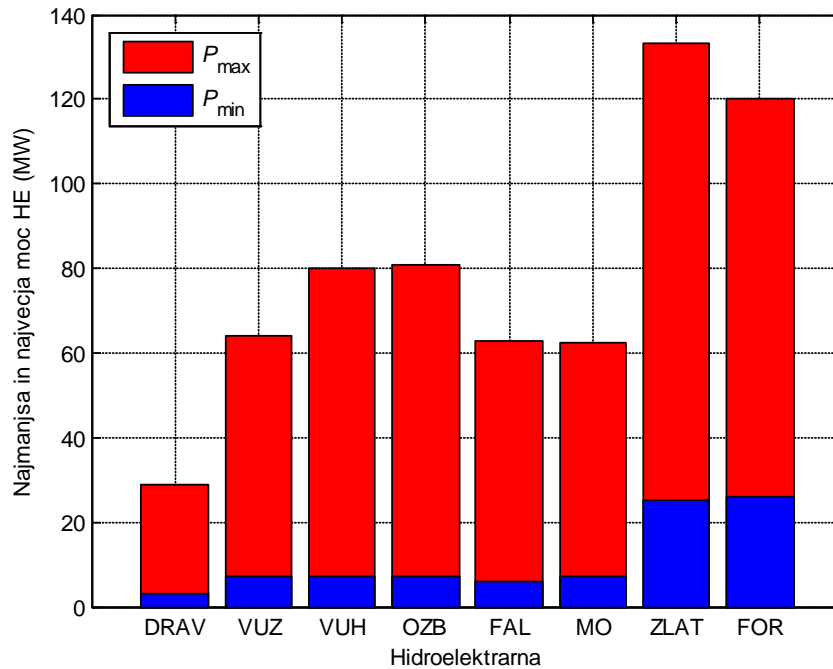
## 2.2 Ocena števila potencialnih možnih rešitev optimizacije

V predhodnem podpoglavju je bilo omenjeno, da je največje možno število spremenljivk 192 in da so te spremenljivke pravzaprav moči posameznih HE v obdobju 24 urnega obratovanja verige DEM. Področje, znotraj katerega se lahko giblje posamezna spremenljivka, je odvisno od razpona moči posamezne HE. Razpon moči posamezne HE je določen z njeno minimalno  $P_{\min}$  in maksimalno močjo  $P_{\max}$ . Minimalna moč HE je v tem primeru moč s katero lahko HE trajno obratuje in ne moč v primeru, ko HE ne obratuje in je njena moč dejansko najmanjša, torej nič. V času obratovanja HE se lahko njena moč spreminja zvezno od minimalne do maksimalne vrednosti. V tabeli 2.3 so prikazane minimalne in maksimalne moči posameznih HE, ter moč na pragu HE. Moč na pragu elektrarne dobimo tako, da od delovne moči turbine odštejemo lastno rabo HE. Moč na pragu HE nas ne zanima, pomembnejši pa sta minimalna in maksimalna moč HE.

Tabela 2.3: Tabela minimalnih in maksimalnih moči, ter moči na pragu elektrarn

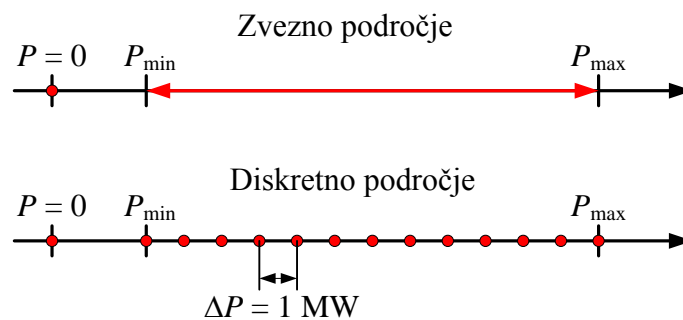
		Hidroelektrarna							
		DRAV	VUZ	VUH	OZB	FAL	MO	ZLAT	FOR
Moč (MW)	min	3	7	7	7	6	7	25	26
	max	28.8	63.9	80.1	80.7	62.8	62.4	133.2	120
	na pragu	26	56	72	73	58	60	114	116

Na sliki 2.1 so v obliki stolpcev prikazani podatki o minimalnih in maksimalnih močeh HE s tabele 2.3. S takšnim načinom prikaza lahko nazorneje predstavimo razpone moči posameznih HE. Z rdečimi stolpci so prikazane maksimalne moči, z modrimi stolpci pa minimalne moči HE.



Slika 2.1: Primerjava minimalnih in maksimalnih moči posameznih HE

Zaradi zveznega razpona moči HE lahko spremenljivka zavzame katero koli vrednost med  $P_{\min}$  in  $P_{\max}$ . Vendar lahko za približno oceno števila možnih rešitev optimizacije zvezno področje spremenljivk spremenimo v diskretno področje, v katerem se lahko na primer moč posamezne HE spreminja le po koraku 1 MW.



Slika 2.2: Pretvorba zveznega v diskretno področje

Zaradi diskretnega spreminjanja moči posamezne HE lahko sedaj posamezna HE tvori končno število različnih moči, ki so razporejene od njene minimalne do maksimalne moči.

V tabeli 2.4 je prikazano koliko različnih moči lahko tvori posamezna HE glede na njen razpon moči, k temu pa je dodano tudi stanje, ko HE ne obratuje ( $P = 0$  MW).

Tabela 2.4: Število različnih moči, ki jih lahko tvori posamezna HE pri  $\Delta P = 1$  MW

	Hidroelektrarna							
	DRAV	VUZ	VUH	OZB	FAL	MO	ZLAT	FOR
Število različnih moči	27	58	75	75	58	57	110	96

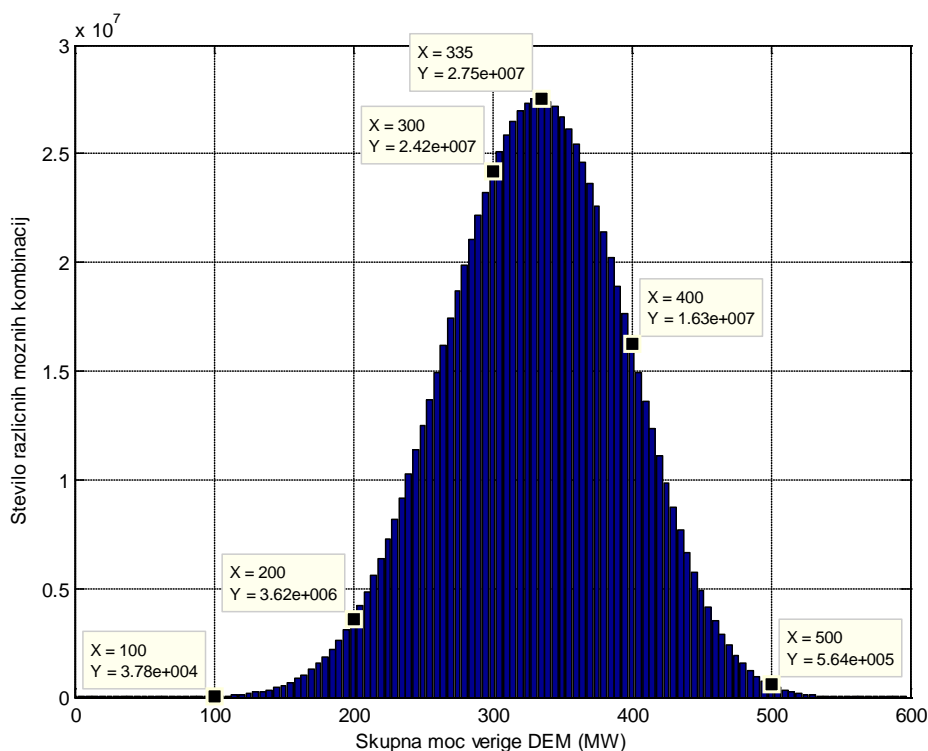
Če pomnožimo vsa možna stanja vseh osmih HE, dobimo vrednost  $3,08 \cdot 10^{14}$ . To veliko število predstavlja število vseh možnih kombinacij, ki jih lahko tvorimo z vsemi osmimi HE na reki Dravi, če bi se njihova moč lahko spreminjala le po koraku 1 MW. Ker pa je to število vseh možnih kombinacij moči HE, ki v našem primeru tvorijo zgolj eno uro obratovanja, je potrebno to število med sabo pomnožiti še 24-krat, da dobimo število vseh možnih obratovalnih diagramov v okviru enega dne. Obratovalni diagram je namreč v najbolj neugodnem primeru sestavljen iz 24 ur, kjer lahko v vsaki uri tvorimo  $3,08 \cdot 10^{14}$  različnih kombinacij. Če število vseh možnih kombinacij za eno uro pomnožimo med sabo 24 krat oziroma izračunamo  $(3,08 \cdot 10^{14})^{24}$  dobimo  $5,12 \cdot 10^{347}$ . Ta vrednost predstavlja število vseh možnih obratovalnih diagramov, ki jih lahko tvorimo za 24 urno obratovanje verige DEM ob  $\Delta P = 1$  MW.

Ker imamo v našem primeru podan samo en obratovalni diagram, je za nas pomembno predvsem vprašanje, na koliko različnih načinov lahko tvorimo podani obratovalni diagram? Odgovor na to vprašanje ni tako enostaven, saj je za vsako skupno moč elektrarne potrebno poznati število možnih kombinacij s katerim lahko tvorimo takšno skupno moč. Število možnih kombinacij, s katerim lahko tvorimo poljuben obratovalni diagram DEM, je torej odvisno od zelenih skupnih moči tega diagrama.

Razpon moči celotne verige DEM je določen z minimalno in maksimalno močjo vseh osmih HE in znaša teoretično (glede na maksimalno moč agregatov) od 3 do 632 MW oziroma v praksi od 3 do 600 MW. Naša želja je bila izračunati in izrisati histogram, ki bi za vseh  $3,08 \cdot 10^{14}$  kombinacij moči HE prikazal, na koliko načinov lahko zagotovimo



posamezno skupno moč vseh osmih HE (s korakom 1 MW od 3 do 632 MW). Vendar se je izkazalo, da bi glede na število možnih kombinacij, takšen izračun trajal slaba dva meseca (več kot 57 dni), kar je nesprejemljivo. Posledično smo se morali zadovoljiti z večjim korakom moči. Zvezno področje spremenljivk smo tako pretvorili v diskretno področje, kjer se lahko moči posameznih HE spreminjajo od njihovih minimalnih do maksimalnih moči s korakom 5 MW in ne 1 MW, kot prej. Pri tem smo minimalne in maksimalne moči HE zaokrožili na najbližjo vrednost moči (znotraj razpona moči), ki je mnogokratnik števila 5. S korakom 5 MW se število različnih moči iz tabele 2.4 precej zmanjša, saj sedaj znaša število različnih moči za primer HE Dravograd le 7 in ne 27. Vseh možnih kombinacij, ki jih lahko tvorimo z verigo DEM, znaša  $8.94 \cdot 10^8$ . Zaradi manjšega števila kombinacij smo lahko izračunali in izrisali histogram, ki je prikazan na sliki 2.3.



Slika 2.3: Histogram števila različnih kombinacij, s katerimi lahko dosežemo posamezno skupno moč verige DEM (večkratniki števila 5)

Iz histograma na sliki 2.3 lahko razberemo, da lahko na največ različnih načinov dosežemo skupno moč  $P = 335$  MW in sicer na  $2,75 \cdot 10^7$  načinov. Rezultat je seveda razumljiv, saj je

logično pričakovati, da lahko na največ različnih načinov določimo tisto moč, ki leži na sredini med minimalno in maksimalno močjo. Nasprotno pa velja, da lahko minimalno in maksimalno moč dosežemo na en sam način, in sicer z neobratovanjem oziroma z maksimalnim obratovanjem vseh HE.

S pomočjo histograma na sliki 2.3 lahko izračunamo število vseh možnih kombinacij, s katerimi lahko dosežemo obratovalni diagram iz tabele 2.1. Zaradi koraka moči 5 MW, je potrebno moči iz obratovalnega diagrama v tabeli 2.1 zaokrožiti na najbližjo vrednost, ki je mnogokratnik števila 5. Na ta način dobimo nov obratovalni diagram (tabela 2.5).

Tabela 2.5: Obratovalni diagram z zaokroženimi močmi na večkratnike števila pet

Ura	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
Moč (MW)	0	0	0	0	0	0	75	240	455	370	480	500
Ura	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Moč (MW)	450	240	325	335	320	295	335	475	510	230	60	5

S pomočjo histograma na sliki 2.3 je potrebno za posamezno skupno moč verige DEM določiti število možnih kombinacij, s katerim lahko dosežemo to moč, kar je prikazano v tabeli 2.6.

Tabela 2.6: Število možnih kombinacij, s katerim lahko zagotovimo posamezno skupno moč verige DEM

Ura	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
št. možnosti	1	1	1	1	1	1	$6,71 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^7$	$5,75 \cdot 10^6$	$2,36 \cdot 10^7$	$1,55 \cdot 10^6$	$5,64 \cdot 10^5$
Ura	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
št. možnosti	$4,92 \cdot 10^6$	$1,02 \cdot 10^7$	$2,73 \cdot 10^7$	$2,75 \cdot 10^7$	$6,39 \cdot 10^6$	$2,32 \cdot 10^7$	$2,75 \cdot 10^7$	$1,93 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^5$	$8,18 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^3$	1

Če želimo izračunati število vseh možnih kombinacij obratovalnih diagramov HE, ki nam vsi zagotavljajo enako skupno moč verige DEM po posameznih urah, kot je podano v obratovalnem diagramu (tabela 2.5), moramo med sabo zmnožiti vse možne kombinacije

iz tabele 2.6. Zaokrožen rezultat množenja je  $1,22 \cdot 10^{109}$ . Vendar je potrebno poudariti, da ta vrednost velja le v primeru, če se lahko moč vseh HE spreminja le po koraku 5 MW. Ker pa se običajno referenčna vrednost moči HE spreminja po koraku 1 MW, za katerega nismo uspeli izračunati histograma (preveliko število kombinacij), je dejansko število vseh možnih kombinacij obratovalnih diagramov HE še bistveno večje od  $1,22 \cdot 10^{109}$ . Prav med temi možnimi kombinacijami obratovalnih diagramov HE, ki nam za vsako uro obratovanja vsi zagotavljajo enake skupne moči verige DEM, želimo s pomočjo optimizacije poiskati optimalne obratovalne diagrame HE.

Zaradi ekstremno velikega števila možnih potencialnih rešitev optimizacije in zahtevanega kratkega časa izračuna je nujno potrebno zmanjšati število potencialnih rešitev optimizacije. Potrebno je poudariti, da je med vsemi možnimi rešitvami optimizacije ogromno takšnih, ki niso sprejemljive. Pri obratovanju verige DEM je namreč potrebno upoštevati vrsto omejitev. Zato je naša naloga, da že pred pričetkom optimizacije izločimo tiste potencialne rešitve optimizacije, za katere zagotovo vemo, da ne ustrezajo zahtevam rezultatov. Na ta način precej zmanjšamo področje, znotraj katerega iščemo optimalno rešitev in posledično povečamo verjetnost izračuna optimalne rešitve, ter skrajšamo čas izračuna optimizacije. Več o ukrepih zmanjševanja števila možnih rešitev optimizacij bo opisano v naslednjih poglavjih.

### 3. MODELIRANJE VERIGE DRAVSKIH ELEKTRARN

Za optimizacijo obratovanja verige DEM potrebujemo model verige DEM. Veriga DEM je v grobem sestavljena iz naslednjih elementov:

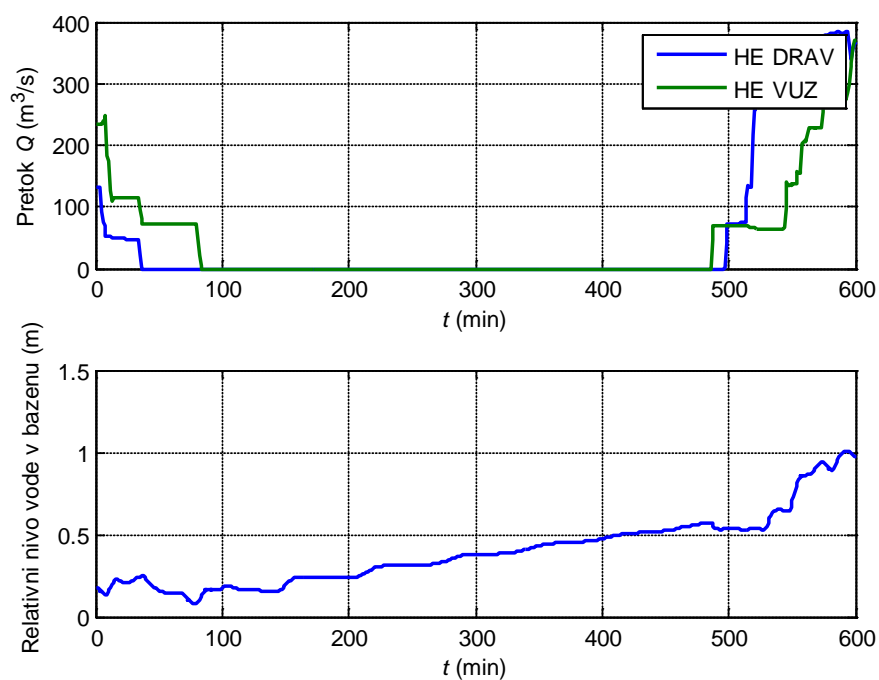
- osmih HE,
- osmih akumulacijskih bazenov,
- dveh kanalov, ki povezujeta bazen in HE,
- osmih koncentriranih lokalnih dotokov, ter
- pritoka in odtoka reke Drave.

Modeliranje HE in akumulacijskih bazenov s kanali predstavlja najzahtevnejši del modeliranja verige DEM, zaradi česar bo njun postopek modeliranja predstavljen v dveh ločenih podpoglavjih.

Lokalne dotoke v posamezni bazen obravnavamo kot en sam dotok vode s konstantno vrednostjo. Vsak bazen ima veliko število manjših pritokov (slika 3.1) njihovi pretoki pa niso poznani. Dejansko lahko pretoke lokalnih dotokov napovemo zgolj približno z dolgoletnimi izkušnjami. Lokalne dotoke lahko sicer izračunamo iz izmerjenih nivojev vode v bazenu, vendar le če HE ne obratujejo (slika 3.2). HE v nočnem času od 1. do 7. ure zjutraj običajno ne obratujejo, zato lahko iz meritev nivoja vode v bazenih izračunamo približno vrednost lokalnih dotokov. Pri tem je potrebno poznati površino bazena in spremembo nivoja vode v bazenu. Vendar nas običajno bolj zanima kakšni bodo lokalni dotoki v prihodnje in ne kakšni so bili, saj načrtujemo obratovanje HE za naslednjih 24 ur. Iz izkušenj planerjev na DEM se za lokalni dotok v bazen HE Vuzenica uporabi vrednost pretoka  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (izlivanje reke Meže v Dravo), za vse ostale HE pa  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Te vrednosti pa veljajo samo v normalnih razmerah, medtem ko se v času poletnih nalivov in spomladanskega taljenja snega temu primerno povečajo.



Slika 3.1: Bazen HE Fala s številnimi lokalnimi pritoki



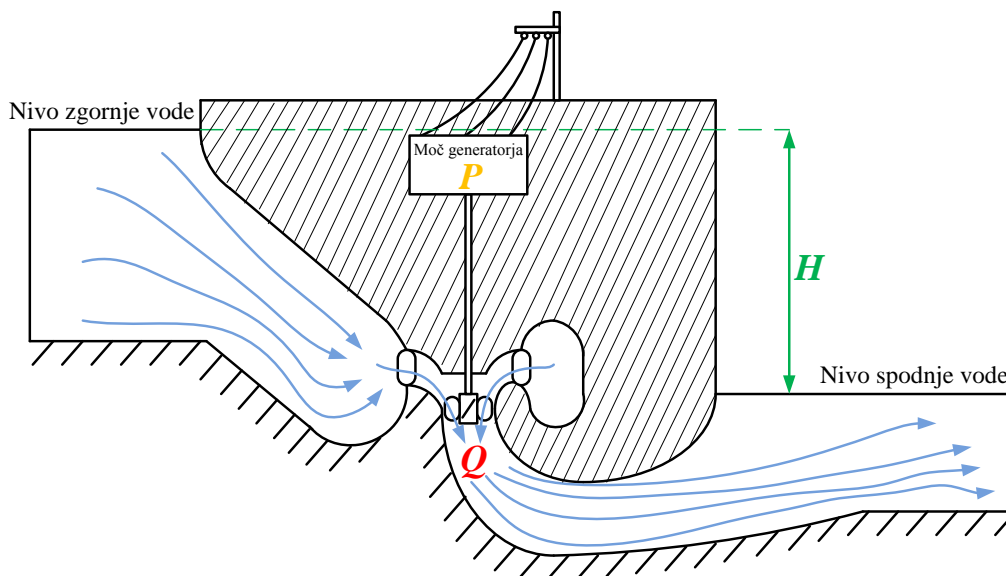
Slika 3.2: Povečanje nivoja vode v bazenu HE Vuzenica zaradi lokalnih dotokov

Na sliki 3.2 je nivo vode v bazenu podan v relativni obliki. Relativna vrednost 0 metrov predstavlja prazen bazen, medtem ko vrednost 1 metra predstavlja polni bazen. Koristna vsebina bazena se nahaja le v območju enega metra (pri večini bazenov).

### 3.1 Modeliranje hidroelektrarn

Veriga DEM je sestavljena iz osmih HE, od tega ima prvih šest tri, zadnji dve pa dva agregata. Vsi agregati znotraj ene HE so povsem enaki in imajo zato povsem enake pretočne karakteristike, razen HE Fala. HE Fala ima dva enaka agregata in enega z nekoliko manjšo nazivno močjo, vendar se njihove pretočne karakteristike skoraj ne razlikujejo.

Pretočna karakteristika agregata podaja odvisnost moči agregata  $P$  od padca vode  $H$  in pretoka  $Q$  (slika 3.3). Pretočna karakteristika se lahko določi na dva načina. Prvi način je na podlagi izdelanih pomanjšanih modelov turbin, na katerih se v laboratoriju opravijo meritve pretokov, padcev in moči. Drugi in hkrati najboljši način pa je z izvedbo vseh meritev na HE. V tem primeru se na HE namestita merilnika nivoja zgornje in spodnje vode, s katerima se natančno izmeri padec vode. Na izhodu sesalne cevi se v vodo spustijo rešetke na katerih je mreža številnih merilnikov hitrosti potovanja vode na celotnem preseku sesalne cevi, na podlagi katerih lahko izračunamo pretok vode. Na izhodne sponke generatorja se namesti merilnik električne moči. Opravijo se številne meritve pri različnih nivojih vode v bazenu, na podlagi katerih se nato določijo pretočne karakteristike agregatov. Pretočna karakteristika je običajno podana v obliki polinoma, ki v obliki ukrivljene ploskve v kartezičnem koordinatnem sistemu podaja odvisnost  $P = f(Q, H)$ .



Slika 3.3: Shematski prikaz HE

Izmerjene pretočne karakteristike opisujejo odvisnost moči od pretokov in padcev  $P = f(Q, H)$ . Pri obratovanju HE pa nas bolj zanima odvisnost pretoka od moči in padca  $Q = f(P, H)$ , saj je moč  $P$  regulirana izhodna spremenljivka. Zaradi tega se mora pretok prilagoditi zahtevani moči, zaradi spremembe pretoka pa se spreminja tudi padec. Pretočne karakteristike je torej potrebno preurediti tako, da bodo omogočale izračun pretoka v odvisnosti od moči in padca. Takšne pretočne karakteristike pa so tudi edine, ki smo jih uporabljali pri modeliranju agregatov HE.

Kot smo omenili, ima večina HE na reki Dravi po tri enake agregate z enakimi pretočnimi karakteristikami. Zato lahko enako skupno moč HE določimo na različne načine. HE Dravograd ima minimalno in maksimalno moč enega agregat  $P_{\min} = 3 \text{ MW}$  in  $P_{\max} = 9.6 \text{ MW}$ . Če želimo doseči skupno moč HE, recimo  $P_{\text{sk,HE}} = 6 \text{ MW}$ , lahko to moč dosežemo na različne načine.

Tabela 3.1: Enaka skupna moč HE Dravograd z različnima vrednostima skupnega pretoka

$P_{\text{sk,HE}} \text{ (MW)}$	Moč agregata (MW)			Skupni pretok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	1	2	3	
6	6	0	0	86.3
6	0	6	0	86.3
6	0	0	6	86.3
6	3	3	0	95.2
6	0	3	3	95.2
6	3	0	3	95.2

Kot lahko razberemo iz tabele 3.1, imamo v prvih treh primerih enako vrednost skupnega pretoka HE. Pri zadnjih treh primerih imamo tudi enako vrednost pretoka, ampak večjo od prvih treh. Torej lahko enako skupno moč HE dosežemo z različnimi pretoki, ki v nekem daljšem časovnem obdobju pomenijo povsem drugačen vpliv na polnjenje in praznjenje bazenov. Zaradi tega bi bilo edino pravilno, da bi pri optimizaciji upoštevali vsak agregat HE kot neodvisno enoto (spremenljivko). Če bi izbrali za spremenljivke število agregatov in ne število HE, potem bi bilo v eni uri optimizacije prisotnih 22 spremenljivk, v 24 urah pa kar 528 spremenljivk. To bi seveda pomenilo bistveno daljši čas optimizacije, kar pa je nesprejemljivo. Zaradi tega je potrebno vse agregate znotraj ene HE predstaviti z enim nadomestnim agregatom, oziroma HE je potrebno obravnavati, kot da ima samo en

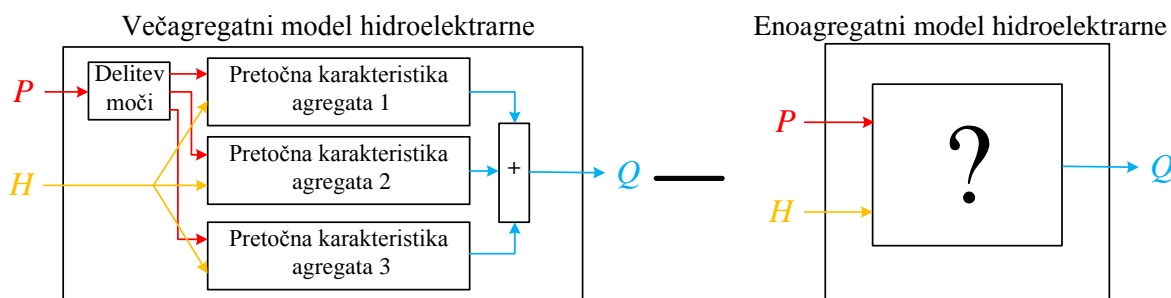
agregat. Večagregatni model HE (VAM) je torej potrebno pretvoriti v tako imenovani enoagregatni model HE (EAM). Pri izdelavi EAM je pomembno to, da se le-ta obnaša čim bolj podobno kot VAM, sicer lahko pride do prevelikih odstopanj pretokov in napačnih rezultatov pri optimizaciji.

Čeprav smo v tabeli 3.1 pokazali, da lahko z različno razporeditvijo skupne zelene moči HE po agregatih dosežemo različne pretoke, v realnem obratovanju HE ni povsem tako. V realnosti se zaradi boljšega izkoristka določijo preklopne karakteristike agregatov, ki določajo kdaj se naj vklopi ali izklopi dodatni agregat. Zato sploh ni možno doseči takšnega obratovanja, kot je prikazano v tabeli 3.1 na zadnjih treh primerih. Preklopne karakteristike namreč določajo, da bo skupno zeleno moč  $P_{sk,HE} = 6$  MW vedno zagotavljal en sam agregat, ne pa dva delno obremenjena agregata. Posledično ne more prihajati do tako velikih razlik med pretoki pri enaki zeleni moči HE. Prav tako pa ne moremo sami odločati kateri od agregatov se bo vklopil ali izklopil, saj o tem odloča lokalni sistem vodenja, ki na podlagi števila ur obratovanja in časa predhodnega obratovanja odloča o vklopih in izklopih agregatov. Lokalni sistem vodenja (računalnik) torej skrbi za enakomerno porazdelitev moči po udeleženi agregatih, saj so izkoristki takrat največji. Ravno ta enakomerna obremenjenost agregatov pa omogoča izvedbo in uporabo EAM hidroelektrarne, saj so v primeru enakomerne obremenitve posameznih agregatov odstopanja med VAM in EAM zelo mala. Z uporabo EAM torej naredimo zanemarljivo napako, po drugi strani pa pridobimo veliko, saj se število spremenljivk iz 528 zmanjša na 192.

Postopek izdelave EAM iz VAM in kakšna so največja odstopanja pretokov pri uporabi EAM namesto VAM, smo zelo podrobno opisali v delih [1] in [2]. Zaradi tega bo v nadaljevanju na primeru HE Dravograd opisan glavni postopek modeliranja EAM, medtem ko postopka določanja odstopanj pretokov ne bomo opisali.

VAM hidroelektrarne je sestavljen iz treh ločenih pretočnih karakteristik, na podlagi katerih lahko izračunamo skupni pretok hidroelektrarne  $Q$ , če poznamo moč  $P$  in padec  $H$  (slika 3.4). Pri EAM pa je potrebno določiti eno pretočno karakteristiko, ki bo enakovredna trem posameznim pretočnim karakteristikam. Pri enaki moči  $P$  in padcu  $H$  bi moral biti pretok  $Q$  z VAM in EAM enak.





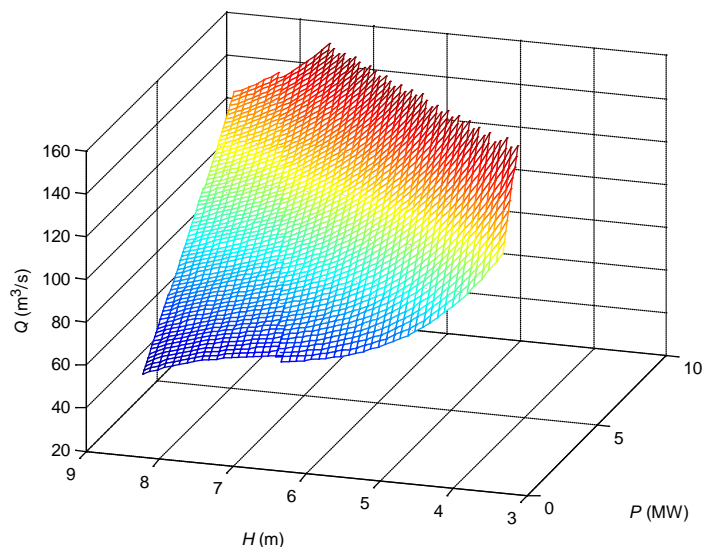
Slika 3.4: Večagregatni in enoagregatni model hidroelektrarne

Kot je že bilo omenjeno imajo vsi agregati znotraj HE enake pretočne karakteristike, lokalni sistem vodenja HE pa skrbi za enakomerno porazdelitev moči po agregatih. Zato lahko EAM HE določimo na precej preprost način. Pretočne karakteristike so predstavljene s polinomi, kot je za HE Dravograd prikazano s (3.1).

$$Q = 256.77 + 106.11 \cdot P + 2.94603 \cdot P^2 + 0.0141946 \cdot P^3 + (-145.357 \cdot H) + (-25.7821 \cdot H \cdot P) + (-0.35749 \cdot H \cdot P^2) + 26.1466 \cdot H^2 + 1.74029 \cdot H^2 \cdot P + (-1.47378 \cdot H^3) \quad (3.1)$$

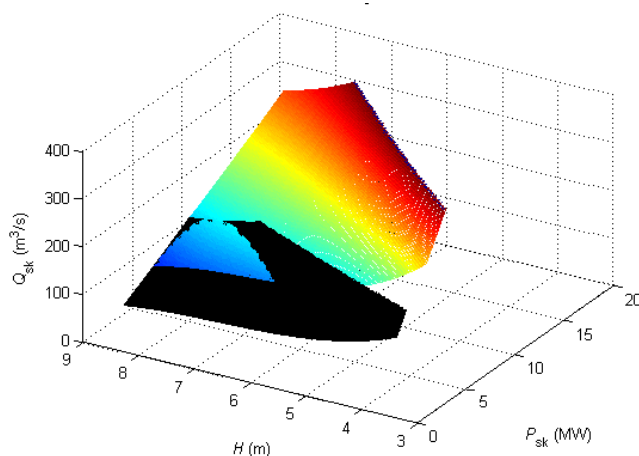
Če torej vpišemo vrednost padca  $H$  in moči  $P$ , dobimo vrednost pretoka  $Q$ . Podjetje Turboinštitut d.d., ki je opravilo umerjanje agregatov, je omejilo področje veljavnosti posameznih polinomov [6]. Polinomi so tako omejeni z minimalnim in maksimalnim padcem  $H$  in pretokom  $Q$ , omejitve moči  $P$  pa niso podali. Omejitve moči smo podali glede na minimalne in maksimalne moči HE. Izven podanih omejitev polinomov izračunamo napačne vrednosti pretoka.

Ker nas zanima celotno veljavno področje polinomov in ne zgolj ena sama vrednost pretoka, določimo matriko padcev  $\mathbf{H}$  in moči  $\mathbf{P}$ , vse od dovoljenih minimalnih do maksimalnih vrednosti. Za vse možne kombinacije moči in padcev izračunamo vrednosti pretokov in tako dobimo matriko pretokov  $\mathbf{Q}$ . Matrike  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{H}$  in  $\mathbf{Q}$  predstavljajo pretočno karakteristiko agregata. Za primer HE Dravograd je pretočna karakteristika  $Q = f(P, H)$  prikazana na sliki 3.5. Na sliki je viden manjkajoči del ploskve (desno zgoraj), kar je posledica zgornje omejitve pretoka  $Q$ .



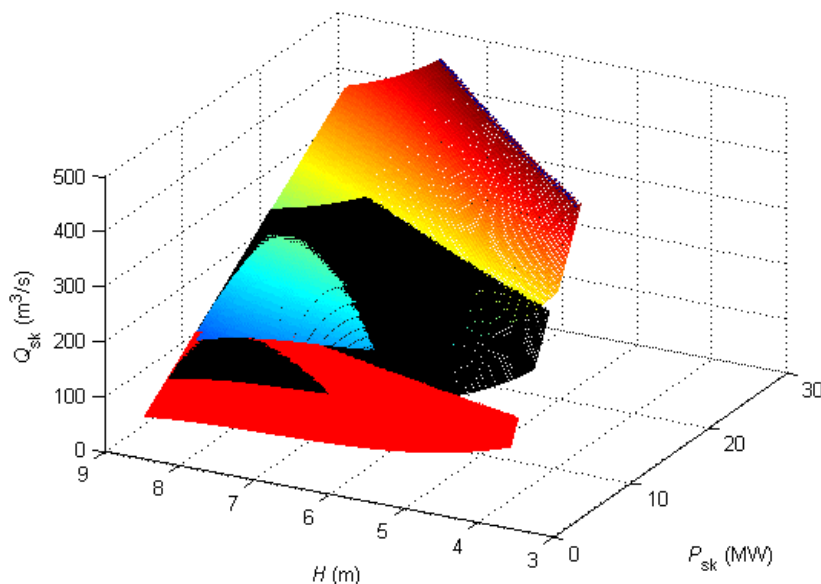
Slika 3.5: Pretočna karakteristika agregata HE Dravograd

Da dobimo EAM elektrarne, je potrebno vse elemente matrike pretokov  $\mathbf{Q}$  in matrike moči  $\mathbf{P}$  pomnožiti s številom 2 in 3. Matrike padcev  $\mathbf{H}$  ne smemo množiti in mora ostati enaka, saj padec ni v nobeni povezavi s številom agregatov, medtem ko moč in pretok sta. Množenje matrik z 2 predstavlja obratovanje HE z dvema agregatoma in novi matriki predstavljata novo ukrivljeno ploskev v prostoru (slika 3.6), kar lahko izrišemo skupaj s ploskvijo enega agregata s slike 3.5.



Slika 3.6: Pretočna karakteristika enega agregata (črna ploskev) in pretočna karakteristika dveh agregatov (barvna ploskev)

Množenje matrik s 3 predstavlja obratovanje HE s tremi agregati in nove matrike predstavljajo novo ukrivljeno ploskev v prostoru, kar lahko izrišemo skupaj s ploskvama s slike 3.6 (slika 3.7).

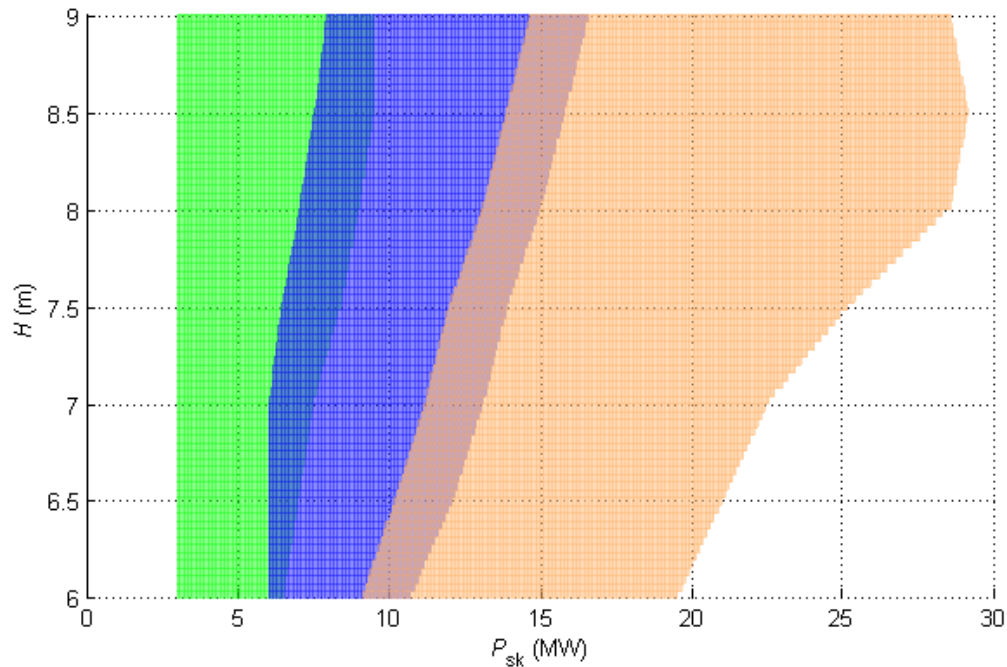


Slika 3.7: Pretočna karakteristika enega (rdeča), dveh (črna) in treh agregatov (barvna)

Kot lahko vidimo na sliki 3.7, se posamezne pretočne karakteristike med sabo prekrivajo. Prekrivanje je posledica dejstva, da lahko nekatere moči HE dosežemo samo z enim, dvema ali tremi agregati. Pri tem so skupni pretoki agregatov različni, kar je razvidno iz prekrivanja ploskev - na sliki 3.7 opazimo prekrivanje črne in rdeče ploskve. V področju prekrivanja karakteristik lahko zagotovimo moč z dvema agregatoma, kar pa pomeni večje vrednosti skupnega pretoka (črna ploskev je nad rdečo), kot pa če bi obratovali zgolj z enim agregatom.

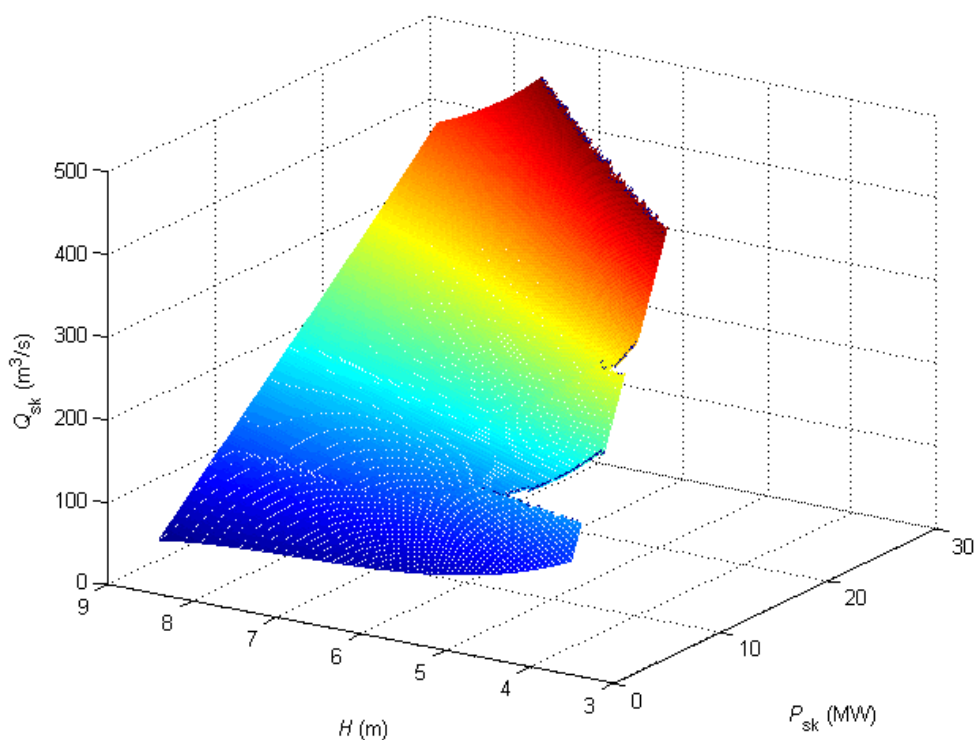
Ker želimo imeti EAM zgolj z eno samo zvezno ploskvijo, brez kakršnih koli prekrivanj, je potrebno uvesti preklopne karakteristike o katerih smo že govorili. Preklopne karakteristike določajo pri kateri moči se vklopi ali izklopi dodatni agregat. Pri tem je uporabljena histereza, s katero se prepreči neprestano vklapljanje in izklapljanje agregatov, če je zelena moč ravno na meji preklopa. Zaradi tega se agregat izklopi pri nekoliko nižji moči kot pa se je vklopil. Na sliki 3.8 so prikazana tri področja obratovanja HE. Znotraj zelenega področja obratuje en sam agregat, znotraj modrega dva agregata, znotraj rjavega

pa vsi trije agregati. Temnejša področja so histereze in predstavljajo prekrivanja posameznih področij.



Slika 3.8: Področja obratovanja HE Dravograd z enim (zelena), dvema (modra) ali tremi agregati (rjava)

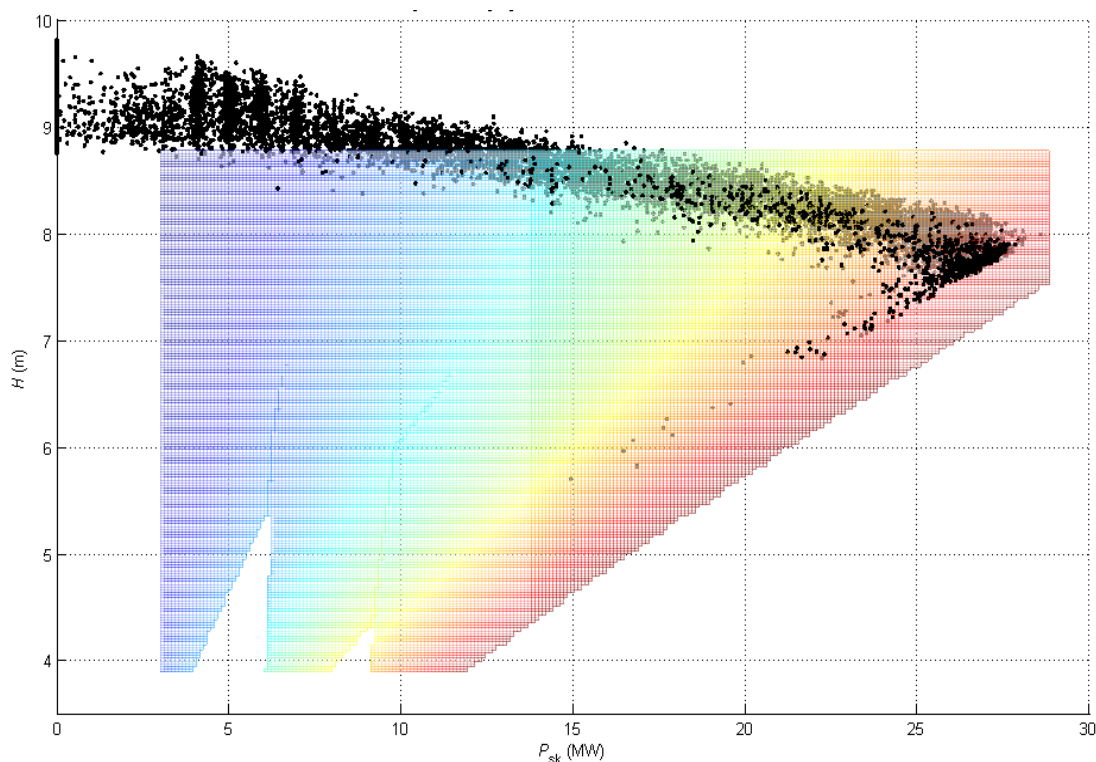
Sredina preklonih karakteristik se uporabi za postavitev meje med posameznimi ploskvami pretočnih karakteristik. Tako nam sredina prve histereze (vklop ali izklop drugega agregata) določa, kje se konča pretočna karakteristika prvega agregata in začne pretočna karakteristika dveh agregatov. Sredina druge histereze (vklop ali izklop tretjega agregata) določa, kje se konča pretočna karakteristika dveh agregatov in hkrati začne pretočna karakteristika treh agregatov. Na ta način izločimo vsa prekrivanja pretočnih karakteristik in dobimo eno samo pretočno karakteristiko, ki predstavlja pretočno karakteristiko celotne HE oziroma enoagregatni model HE (slika 3.9).



Slika 3.9: Pretočna karakteristika HE enoagregatnega modela HE

Po opisanem postopku so bili narejeni modeli vseh HE na reki Dravi in so v osnovni obliki predstavljeni z matrikami moči  $\mathbf{P}$ , padcev  $\mathbf{H}$  in pretokov  $\mathbf{Q}$ . Ker je model verige DEM sestavljen v programu Simulink, kjer so modeli HE predstavljeni v obliki tabele (Lookup Table), je bilo potrebno matrike pretokov  $\mathbf{Q}$  nekoliko spremeniti. V matriki pretokov  $\mathbf{Q}$  namreč ne sme biti elementov, ki bi bili prazni ali nedefinirani (NaN – Not a Number). Na sliki 3.9 se vidijo manjkajoči deli ploskve, ki so posledica zgornje omejitve pretokov. Posledično smo morali opustiti zgornjo omejitev pretoka, saj smo lahko le na ta način določili vse elemente matrike  $\mathbf{Q}$ . Naknadno se je pojavila tudi težava z zgornjo omejitvijo padca. Iz izmerjenih vrednosti padcev na HE se je namreč pokazalo, da so le-ti na HE Dravograd dejansko večji od podanih omejitev, s katerimi so omejeni polinomi (slika 3.10). Zato je bilo potrebno kljub omejitvam polinomov podaljšati pretočne karakteristike, tako da je bilo možno izračunati pretoke tudi pri višjih padcih vode. Pretočnih karakteristik pa nismo podaljšali s polinomi. Polinomi namreč omogočajo pravilne izračune pretokov le znotraj območja omejitev, izven omejitev pa dobimo napačne vrednosti pretokov. Čim dlje stran od omejitev računamo pretoke, večja je storjena napaka. Zato nismo mogli uporabiti polinomov za izračun pretokov pri višjih padcih, saj so bile

izračunane vrednosti povsem nerealne. Pretočne karakteristike smo zato podaljšali z ekstrapolacijo točk, ki ležijo v dovoljenem področju polinomov. Na ta način smo pri višjih padcih dobili povsem realne vrednosti pretokov, ki so zaradi večjega padca le nekoliko manjši od pretokov v veljavnem področju polinomov. Na predhodno opisani način smo podaljšali vse pretočne karakteristike za en meter (višji padec), čeprav se je omenjena težava pojavljala predvsem pri dveh HE. Podaljšani EAM hidroelektrarn so končne oblike modelov HE in so neposredno uporabljeni v modelu verige DEM.



Slika 3.10: Pretočna karakteristika HE Dravograd z izmerjenimi delovnimi točkami, ki predstavljajo urna povprečja v časovnem obdobju enega leta

### 3.2 Modeliranje bazenov

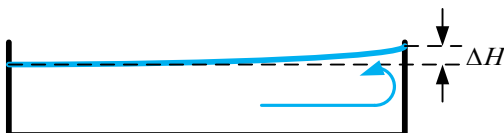
Modeli bazenov, so tako kot modeli HE, najpomembnejši del modela verige DEM. Zaradi relativno majhne akumulacije bazenov, ki se razprostirajo na več kilometrih ozke struge reke Drave, je dinamika pretakanja vode iz začetka do konca bazena zelo velika. Zaradi naglega spreminjanja nivojev vode v bazenih je skorajda nemogoče izvesti optimizacijo verige DEM, ne da bi uporabili dinamične modele bazenov. Pri

poenostavljenih modelih bazenov se le-ti obravnavajo kot posode z vodo, v katerih je nivo po vsej gladini enak. Nivo vode v bazenu se spreminja glede na razliko pritokov in odtokov, vendar se ta sprememba pozna hkrati na začetku kot na koncu bazena. S tem ni upoštevan potreben čas potovanja vode od začetka do konca bazena, kar je glavna pomanjkljivost poenostavljenih modelov bazenov. Ker čas potovanja vode ni upoštevan, se na koncu bazena ne pojavi upad vode zaradi obratovanja HE. Upad vode na koncu bazena se pojavi pri povečanju odtoka vode iz bazena, saj voda zaradi svoje vztrajnosti ne more tako hitro pritekati iz ostalih predelov bazena (slika 3.11), kot odteka.



Slika 3.11: Upad vode na koncu bazena pri povečanem odtoku

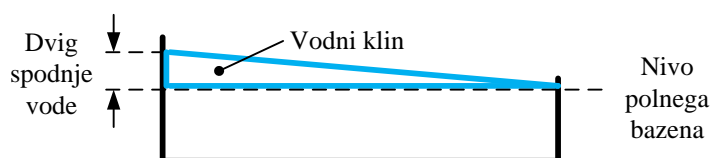
Ravno obratni pojav pa se zgodi pri zmanjšanju odtoka iz bazena, kjer pride do povišanja nivoja vode tik ob elektrarni. Povišanje nivoja vode je posledica vztrajnosti vode, ki je imela pred zmanjšanjem pretoka vode konstantno hitrost in s tem določeno kinetično energijo. Zaradi zmanjšanja odtoka vode iz bazena, se kinetična energija vode spremeni v potencialno energijo, zato se nivo vode tik ob elektrarni dvigne (slika 3.12). Ta dvig vode se v obliki vala odbije od jezua elektrarne in potuje nazaj proti začetku bazena.



Slika 3.12: Dvig vode ob elektrarni pri zmanjšanju odtoka vode

Vse te dinamične spremembe nivoja vode na začetku in na koncu bazena imajo vpliv na padec, kar seveda vpliva na pretok vode pri konstantni moči HE. Zraven tega pa z neupoštevanjem dinamike bazena zanemarimo tudi dejstvo, da lahko bazen pri konstantnem dotoku in odtoku vode sprejme večjo količino vode kot v svojem stacionarnem stanju. Pri konstantnem obratovanju se namreč pojavi tako imenovani vodni

klin, v katerem je nezanemarljivo velika količina vode. Če predpostavimo, da je bazen v stacionarnem stanju povsem poln, lahko kljub temu začnemo obratovati s HE na začetku bazena in s tem dolivati vodo v bazen. Zaradi potrebnega časa potovanja vode od začetka do konca bazena se bo ta povečana količina vode v bazenu poznala šele po določenem času tudi na koncu bazena (20 do 30 minut). Če bi v trenutku, ko val vode doseže konec bazena, pričeli obratovati s HE na koncu bazena in s tem prazniti bazen, to ne bi imelo nobenega vpliva na dvig vode na koncu bazena. Seveda pa bi bila v takem primeru v bazenu večja količina vode (polni bazen + klin, slika 3.13), kot pa v primeru stacionarnega stanja bazena.



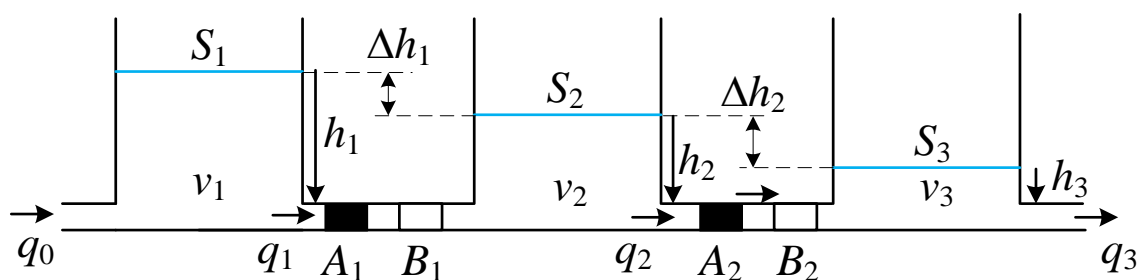
Slika 3.13: Polni bazen z vodnim klinom

Upoštevati pa moramo, da je po končanem obratovanju treba najprej ustaviti dotok vode v bazen in še nekaj časa obratovati s spodnjo HE, saj bi se v nasprotnem primeru klin izravnal in bi skupaj z že polnim bazenom (v stacionarnem stanju) presegel dovoljeni nivo vode v bazenu. Vseh teh opisanih dinamičnih stanj vode v bazenu ni možno opisati brez dinamičnih modelov bazenov.

Ker je potrebno uporabiti dinamične modele bazenov in hkrati zmanjšati čas izračuna celotnega modela verige DEM, je bilo potrebno uporabiti poenostavljene dinamične modele bazenov. Poenostavljeni dinamični modeli se morajo na spremembe pritokov in odtokov vode odzivati enako kot se realni bazeni, hkrati pa morajo biti dovolj enostavni, da je čas izračuna čim krajši.

Model bazena smo ponazorili z zaporedno vezavo treh manjših bazenov (slika 3.14). En del bazena predstavlja eno tretjino celotnega bazena, zato je površina njegove gladine enaka eni tretjini površine celotnega bazena (tabela 3.2). Gladina vode je v posameznem delu bazena enaka na celotni površini, spreminja se lahko le njena višina.





Slika 3.14: Trije zaporedno vezani deli bazena s povezovalnimi elementi

Na sliki 3.14 so:

$S$  - površina dela bazena

$v$  - volumen vode v bazenu

$q$  - pretok vode

$h$  - nivo vode v bazenu

$\Delta h$  - razlika nivojev vode v dveh sosednjih delov bazena

$A$  – vztrajnost vodne mase

$B$  – upornost rečne struge

Tabela 3.2: Površine bazenov in kanalov

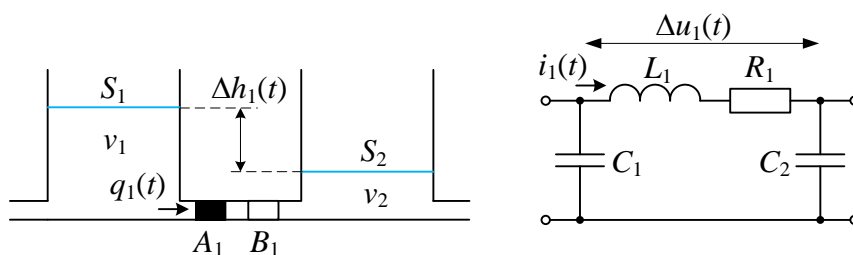
Bazeni hidroelektrarn								
Površina	DRAV	VUZ	VUH	OZB	FAL	MO	ZLAT	FOR
(m <sup>2</sup> )	$1.43 \cdot 10^6$	$1.96 \cdot 10^6$	$2.41 \cdot 10^6$	$1.54 \cdot 10^6$	$0.89 \cdot 10^6$	$2.39 \cdot 10^6$	$0.91 \cdot 10^6$	$4.26 \cdot 10^6$
							Kanal	
							$0.90 \cdot 10^6$	$0.45 \cdot 10^6$

Zaradi analogije električnih in vodnih tokokrogov lahko s pomočjo enačb električnih tokokrogov zapišemo ekvivalentne enačbe vodnih tokokrogov. Posamezni del bazena na sliki 3.14 lahko obravnavamo kot kondenzator. Tako kot je napetost  $u(t)$  kondenzatorja odvisna od kapacitivnosti  $C$  in integrala električnega toka  $i(t)$ , tako je nivo vode  $h(t)$  v bazenu odvisen od površine bazena  $S$  in integrala vodnega toka  $q(t)$  (3.2).

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + u_0, \quad h(t) = \frac{1}{S} \int q(t) dt + h_0 \quad (3.2)$$

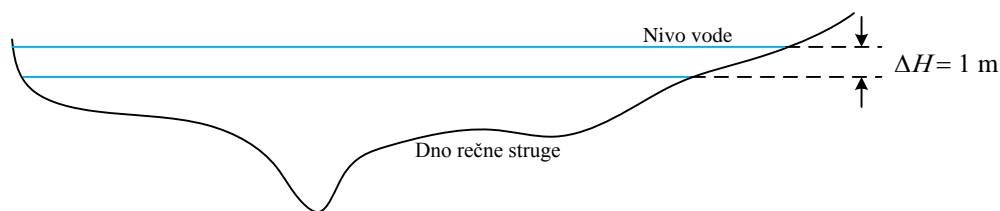
Podobno kot razlika napetosti med dvema sosednjima kondenzatorjema požene električni tok, tako tudi razlika nivojev vode v dveh sosednjih bazenih požene vodni tok. V analogiji z električno induktivnostjo  $L$  in upornostjo  $R$  lahko definiramo parameter  $A$  in  $B$ , ki v vodnem tokokrogu predstavljata vztrajnost vodne mase in upornost rečne struge. Vztrajnost vodne mase in upornost rečne struge se sicer lahko določita analitično, ampak njuni vrednosti nista konstantni [3]. Zato vpeljemo konstantni vrednosti  $A$  in  $B$ , ki imata v vodnem tokokrogu enak vpliv kot ga imata induktivnost  $L$  in upornost  $R$  v električnem tokokrogu. Na podlagi ekvivalentnega električnega vezja (slika 3.15) lahko s (3.3) zapišemo razliko nivojev vode med dvema sosednjima bazenoma.

$$\Delta u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad , \quad \Delta h(t) = Bq(t) + A \frac{dq(t)}{dt} \quad (3.3)$$



Slika 3.15: Ponazoritev bazena z električnim vezjem

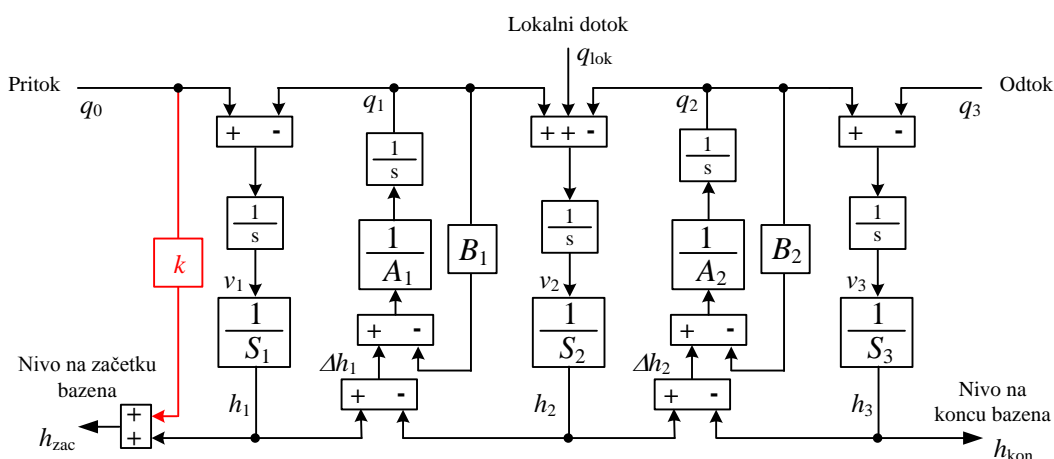
Višino vode  $h$  v posameznem bazenu lahko izračunamo z deljenjem prostornine vode  $v$  s površino bazena  $S$ . Vendar v realnosti bazen nima konstantne površine, ampak se ta spreminja s spreminjanjem višine vode (slika 3.16). Pri obratovanju DEM so postavljene omejitve spreminjanja nivoja vode v bazenu, ki so v večini primerov največ en meter. Čeprav je globina bazena precej večja, se lahko nivo vode na koncu bazena spreminja zgolj znotraj enega metra. Na začetku bazena pa je lahko nivo vode med obratovanjem HE precej večji zaradi dviga spodnje vode oziroma ustvarjenega klina (slika 3.13).



Slika 3.16: Presek rečne struge s spremenljivo površino vode

Ker se lahko nivo vode spreminja zgolj v območju enega metra in ker je površina bazena precej večja, ne naredimo velike napake, če računamo višino vode v bazenu s konstantnimi površinami bazenov  $S$ .

Spreminjanje nivojev vode v zaporedno vezanih posodah s slike 3.14 lahko opišemo z enačbama (3.2) in (3.3). Matematični model treh zaporedno vezanih bazenov (slika 3.14) ponazorimo z blokovno shemo na sliki 3.17. Razlika pritoka  $q_0$  in odtoka  $q_1$  v prvi bazen povečuje ali zmanjšuje prostornino vode v bazenu (integrator). Izhod iz integratorja je torej prostornina vode v bazenu  $v_1$ . Če prostornino pomnožimo z obratno vrednostjo površine bazena  $S_1$ , dobimo višino vode v bazenu  $h_1$ . Pri ostalih dveh bazenih je postopek povsem enak, le da ima drugi bazen dodan še lokalni pritok  $q_{lok}$ . Različna nivoja vode v prvem  $h_1$  in drugem bazenu  $h_2$  povzročita razliko nivojev  $\Delta h_1$ , ki požene vodni tok. Zaradi ustreznosti se razlika nivojev seveda nekoliko zmanjša.

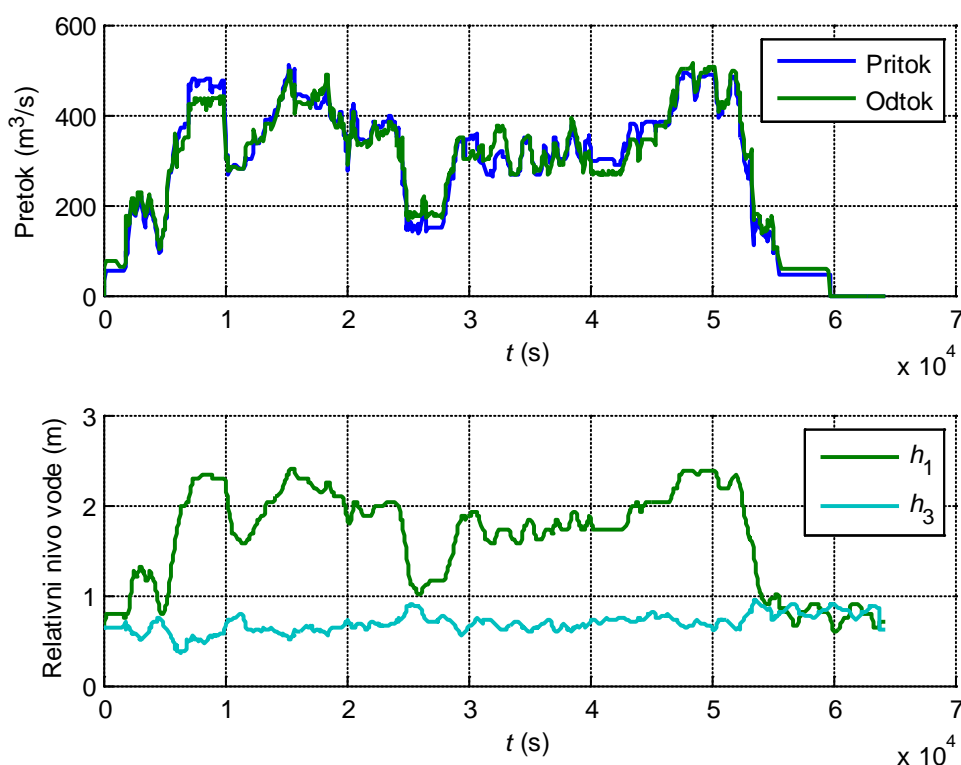


Slika 3.17: Blokovna shema dinamičnega modela bazena s tremi deli

Pri modeliranju bazenov smo zaradi hitrejšega izračuna uporabili zgolj tri dele bazena. Zaradi treh delov bazena so površine teh bazenov precej velike, zato se mora prostornina vode v bazenu precej povečati, da se nivo sploh spremeni. Zaradi tega je nemogoče doseči velike spremembe nivoja vode v kratkem časovnem obdobju. Ker pa je dvig spodnje vode zelo odvisen od pritoka vode v bazen, je potrebno k nivoju vode prvega dela bazena  $h_1$  prišteti še dvig spodnje vode. Ta dvig spodnje vode je na sliki 3.17 označen z rdečo barvo in predstavlja množenje pritoka s konstanto  $k$ . Blokovna shema na sliki 3.17 predstavlja dinamični model enega bazena, ki je povsem enak za prvih 6 HE, le vrednosti parametrov so drugačne. Bazena zadnjih dveh HE imata zaradi kanala le to razliko, da sta sestavljena iz štirih delov in ne iz treh. Tretji in četrti del predstavljata kanal, ki je precej ožji od struge reke Drave, zato se na koncu kanala pojavljajo večje spremembe nivoja vode. Zaradi večje dinamike je bilo potrebno površino zadnjega bazena temu primerno zmanjšati in s tem omogočiti hitrejše spreminjanje nivoja vode.

Kot je že bilo omenjeno, obstajajo analitični izrazi s katerimi lahko določimo vztrajnost vodne mase in upornost rečne struge, vendar je na ta način precej težje določiti prave vrednosti parametrov, ki pa niti niso konstantne vrednosti. Zaradi tega smo se odločili poiskati parametre blokovne sheme (slika 3.17) s pomočjo optimizacije. S pomočjo genetskega algoritma smo poiskali takšne parametre modela bazena, da se je le-ta na izmerjene spremembe pretoka in odtoka vode odzival povsem enako kot se je dejanski bazen. Za optimizacijo smo uporabili minutna povprečja izmerjenih pritokov, odtokov, nivoja vode na začetku bazena in nivoja vode na koncu bazena, ki so bili izmerjeni v 24 urah. Omenjene meritve so za primer HE Ožbalt prikazane na sliki 3.18. Pri optimizaciji so bile spremenljivke vsi neznani parametri blokovne sheme:

- vztrajnosti vodne mase  $A_1, A_2$ ,
- upornosti rečne struge  $B_1, B_2$
- funkcija dviga spodnje vode  $k$  in
- vrednost lokalnega dotoka  $q_{lok}$ .

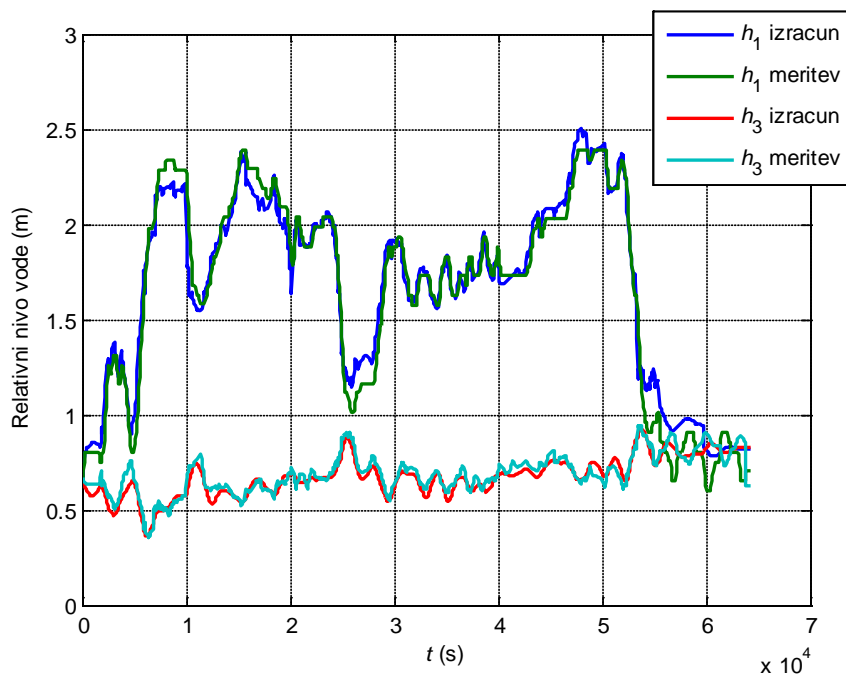


Slika 3.18: Izmerjene vrednosti pritoka, odtoka ter nivoja vode v bazenu HE Ožbalt

Izmerjena in izračunana nivoja vode v bazenu se morata ujemati samo na začetku in na koncu bazena, saj le ta dva vplivata na padec in s tem na izračun pretoka HE. Prav tako pa niti nimamo meritev nivoja vode na drugih predelih bazena. Vrednosti pretokov se v realnosti ne merijo ampak se računajo na podlagi pretočnih karakteristik, izmerjenih padcev  $H$  in izmerjene moči  $P$ . Zaradi poznanih težav z meritvijo nivojev vode in posledično napak pri meritvi padcev, izračunani pretoki niso najbolj točni. Posledično so se pojavljale težave z nekaterimi HE, saj bilanca pritokov in odtokov v 24 urah ni bila ustrezna. Iz meritev nivojev vode je bilo ugotovljeno enako stanje nivojev vode pred in po končanem obratovanju HE, kar je kazalo na enako vsoto pritokov in odtokov. Iz vsote izmerjenih pritokov (izmerjeni s HE + ocenjeni lokalni dotoki) in odtokov pa se je izkazalo, da bi morale biti v bazenu po končanem obratovanju HE precej več ali pa manj vode. Iz tega smo lahko sklepali, da izmerjenini pritoki in odtoki niso povsem ustrezni in jih je bilo potrebno spremeniti. To pa je med drugim tudi vzrok, zakaj smo pri iskanju optimalnih parametrov nadomestnega vezja kot spremenljivko uporabili tudi lokalni pritok. Z lokalnim pritokom smo lahko korigirali morebitna odstopanja meritev pritokov in

odtokov. Seveda pa je moral biti končni rezultat lokalnega dotoka tudi logičen, sicer je bilo potrebno izmerjene pretoke korigirati že pred iskanjem optimalnih parametrov nadomestnega vezja.

Na sliki 3.19 je za primer bazena HE Ožbalt prikazan potek izmerjenih in izračunanih nivojev vode na začetku in na koncu bazena. Opazimo lahko zelo dobro ujemanje nivojev vode poenostavljenega dinamičnega modela bazena z izmerjenimi vrednostmi.



Slika 3.19: Poteki izmerjenih in izračunanih nivojev vode v bazenu HE Ožbalt

Pri optimizaciji verige DEM je 24 ur najdaljše časovno obdobje za katerega računamo obratovalne diagrame HE. Če želimo hiter izračun modela verige DEM, časovni korak integracije ne sme biti prekratek, po drugi strani pa ne sme biti predolg, da napaka numeričnega izračuna ni prevelika. Pet minutni časovni korak integracije se je izkazal kot najdaljši, ki je še sprejemljiv. Zaradi tega je bilo potrebno model bazena, ki je le en del modela verige DEM, določiti pri daljšem časovnem koraku. Pri iskanju parametrov modela bazena smo zato izbrali časovni korak integracije 10 minut, kar je dvojna vrednost najdaljšega časovnega koraka integracije modela verige DEM (5 minut). Z izbiro daljšega časovnega koraka integracije smo se izognili težavam, ki bi lahko nastale pri izračunu

modela verige DEM. Če bi iskali parametre modela bazena pri krajšem časovnem koraku integracije, kot pa je najdaljši časovni korak integracije modela verige DEM, bi lahko optimizacija izbrala krajše časovne konstante modela ( $\tau = A/B$ ). Če bi v modelu verige DEM uporabili model bazena s krajšimi časovnimi konstantami kot pa je najdaljši časovni korak integracije (5 minut), bi lahko prišlo do napake pri izračunu modela verige DEM. Časovni korak integracije namreč mora biti krajši od najkrajše časovne konstante modela.

S pomočjo optimizacije in opisanih postopkov so bili določeni vsi potrebni parametri vseh osmih bazenov HE. Dobro ujemanje izmerjenih in izračunanih novojev vode v bazenu (slika 3.19) kaže na to, da je možno s poenostavljenim dinamičnim modelom, ki vsebuje zgolj tri dele in funkcijo dviga spodnje vode, določiti dober dinamični model bazena.

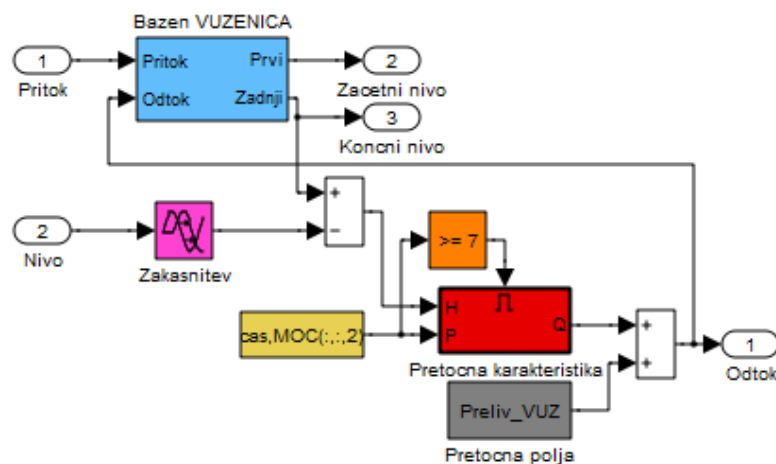
### 3.3 Modeliranje verige dravskih elektrarn

V prejšnjih dveh podpoglavjih je bilo posebej opisano modeliranje HE in modeliranje bazenov. V tem podpoglavju bo opisano na kakšen način sta v zaključeno celoto povezana HE in bazen in kako so te zaključene celote povezane v celotno verigo DEM.

Na sliki 3.20 je prikazan model HE Vuzenica, ki vsebuje akumulacijski bazen. Bazen HE Vuzenica je na sliki predstavljen z blokom modre barve. Vhoda v blok sta pritok vode iz HE Dravograd, ter odtok. Odtok iz bazena je odvisen od pretoka HE Vuzenica in prelivanja vode čez pretočna polja. Izhoda iz bazena sta nivo vode na začetku in na koncu bazena. Nivo vode na začetku bazena je uporabljen za izračun padca HE Dravograd, medem ko je nivo vode na koncu bazena uporabljen za izračun padca HE Vuzenica. Padec vode HE Vuzenica torej dobimo, če od nivoja vode na koncu bazena HE Vuzenica odštejemo nivo vode na začetku bazena HE Vuhred, ki pa je zakasnen za čas koraka integracije (blok vijolične barve). Z zakasnitvijo podatka se izognemo algebrajski zanki. Algebrajska zanka je posledica dejstva, da je za izračun padca vode potreben nivo vode iz naslednjega bazena, ki pa še ni izračunan. Padec je povezan na vhod rdečega bloka, ki predstavlja model HE Vuzenica. Blok rjave barve predstavlja podatek predvidene moči HE Vuzenica. Podatek o moči HE je sestavljen iz dveh matrik, matrike časa in matrike

vrednosti moči, ki skupaj tvorita zaporedje moči s konstantnimi vrednostmi v času ene ure. Vrednosti konstantnih moči so za posamezno uro določene z optimizacijo. Blok rdeče barve predstavlja model HE v katerem se nahaja pretočna karakteristika, ki na podlagi vhodnega padca vode in moči izračuna vrednost pretoka. Blok sive barve predstavlja konstantno vrednost pretoka prelivnih polj, ki skupaj s pretokom HE predstavlja celotno vrednost pretoka HE Vuzenica. Vrednost odtoka iz bazena HE je povezana na vhod bazena HE Vuzenica (odtok) in na vhod bazena HE Vuhred (pritok), saj je odtok enega bazena hkrati pritok naslednjega bazena. Blok oranžne barve predstavlja pogoj za izračun pretoka HE. Če je zelena moč enaka nič, ne računamo pretoka s pretočnimi karakteristikami, ampak postavimo vrednost pretoka na nič. Na ta način prihranimo čas, ki je potreben za izračun pretoka s pomočjo interpolacije pretočne karakteristike (krajši čas izračuna modela).

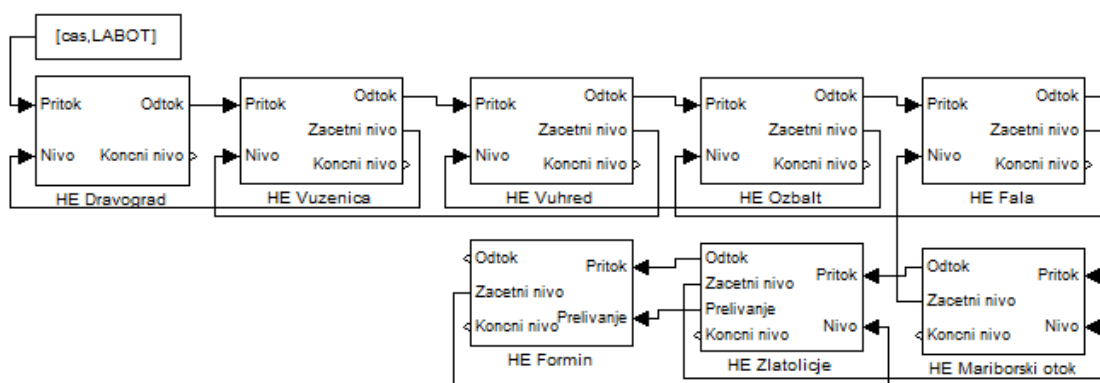
Na opisani način je sestavljen model s slike 3.20 in je povsem enak za vseh 8 HE, le pri HE Zlatoličje in HE Formin so manjše razlike, ki pa jih podrobneje ne razlagamo. Te razlike so predvsem posledica kanalov, zaradi katerih so prelivna polja ločena od HE in zato prelivanje vode ne vpliva na dvig spodnje vode.



Slika 3.20: Blokovna shema HE Vuzenica

Zaključene celote HE so med sabo povezane v verigo DEM in tako predstavljajo končni model, ki se uporablja pri optimizaciji obratovanja verige DEM (slika 3.21).





Slika 3.21: Veriga hidroelektrarn

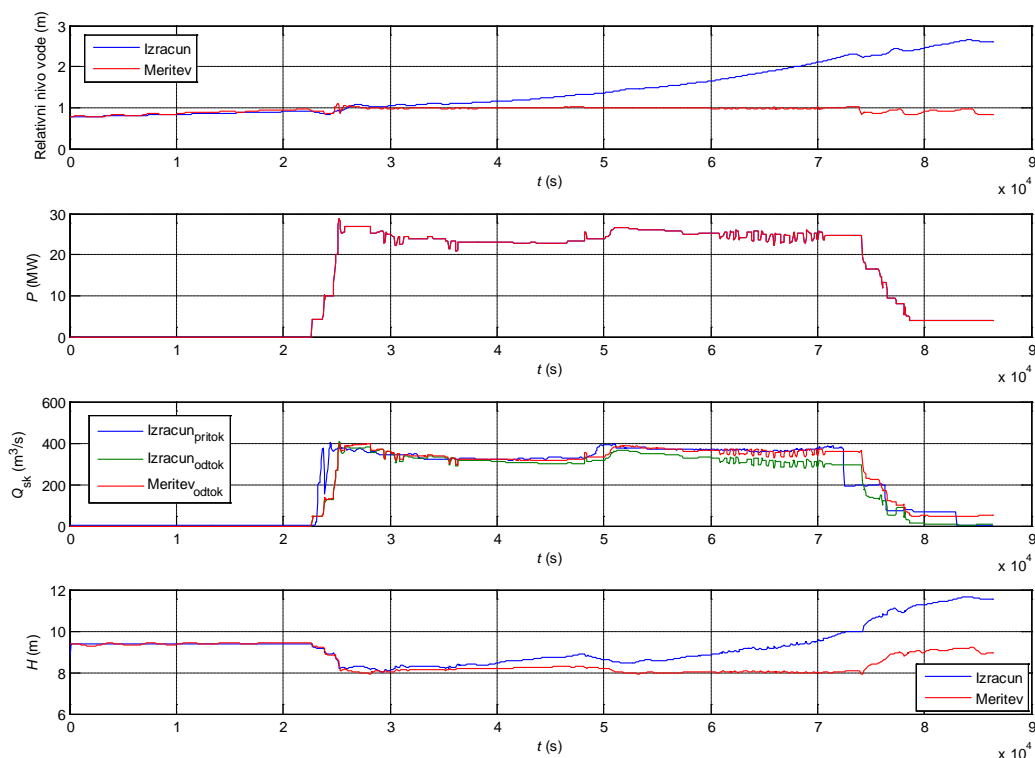
Na sliki 3.21 je prikazan zgolj osnovni model verige DEM, medtem ko je dejanski model bolj obsežen. K osnovnemu modelu so namreč dodani številni bloki za shranjevanje izmerjenih veličin, bloki s katerimi ugotavljamo ali so nivoji vode v bazenu znotraj dovoljenih meja in podobno. Ker je del blokovne sheme za opazovanje spremenljivk in načina sankcioniranja nedovoljenih stanj možno spreminjati, tega dela modela nismo prikazali.

### 3.4 Verifikacija modela verige dravskih elektrarn

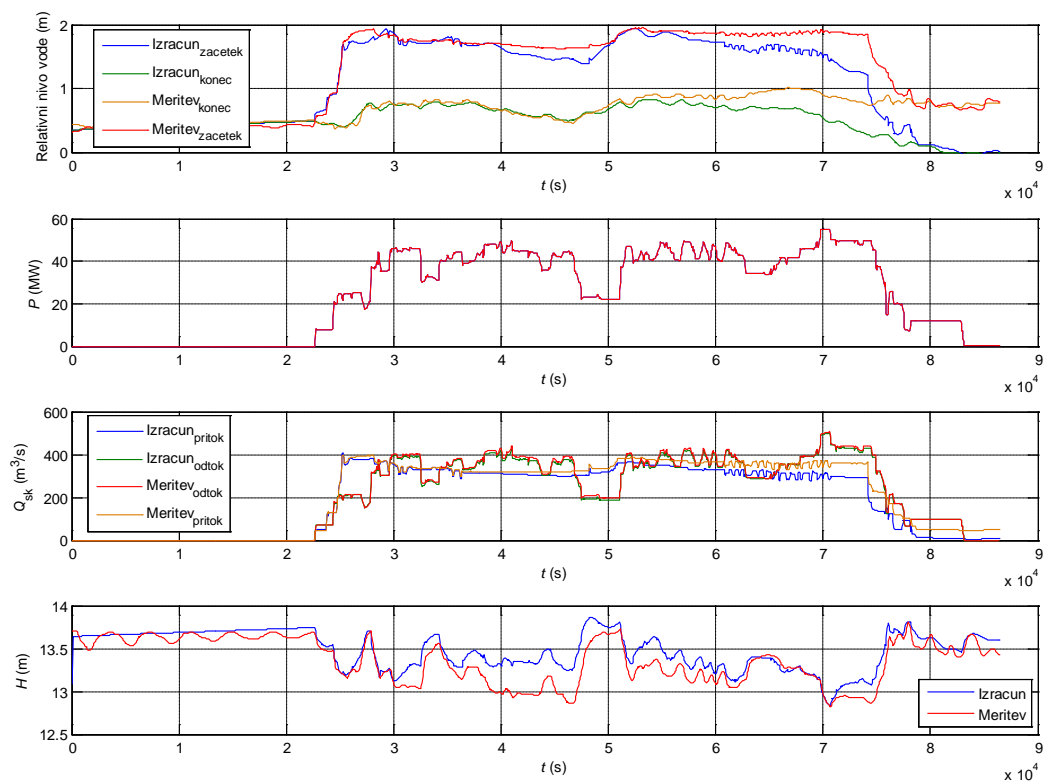
Za sestavljeni model verige DEM je bilo potrebno pred uporabo preveriti, ali dovolj dobro opisuje obnašanje realne verige DEM. V ta namen smo uporabili minutna povprečja izmerjenih moči, pretokov in nivojev vode na začetkih in na koncih bazenov. Izmerjeni podatki obsegajo časovni okvir enega dne in sicer od 0:00 do 24:00 ure. Iz izmerjenih nivojev vode smo razbrali začetna stanja bazenov v stacionarnem stanju, ter približno ocenili vrednosti lokalnih pritokov. Iz izmerjenih nivojev vode in poznanih površin delnih bazenov smo lahko izračunali začetna stanja prostornin vode v bazenih. Iz meritev moči smo pripravili zaporedja moči (blok rjave barve na sliki 3.20) za posamezne HE, ki skupaj z nivoji bazenov in pripadajočimi padci vode določajo pretoke HE. Začetna stanja prostornin vode v bazenih, vrednosti lokalnih pritokov in moči posameznih HE so edina povezava med realno verigo DEM in modelom verige. Če sestavljeni model verige DEM dobro opisuje obnašanje realne verige, bi se morali izračunani pretoki in nivoji vode v bazenu ujemati z izmerjenimi vrednostmi.

Zaradi nepoznavanja natančnih vrednosti lokalnih dotokov, odstopanj pretokov zaradi ne povsem točnih pretočnih karakteristik, nepoznavanja natančnih prostornin vode v bazenih, je z daljšim časom opazovanja možno pričakovati vedno večja odstopanja med izračunanimi in izmerjenimi nivoji vode v bazenih. Potrebno se je namreč zavedati, da bazeni predstavljajo integratorje, ki so s sistemskega vidika nestabilni element. Če je razlika pritokov in odtokov vode v bazen različna od nič, to pomeni polnjenje ali praznjenje bazena, ki lahko povzroči prekomerno napolnjenost ali izpraznjenost bazena. Čas trajanja polnjenja ali praznjenja bazena je odvisen od velikosti razlike pritokov in odtokov vode, ter od prostornin bazena. Zaradi omenjenih razlik lahko pričakujemo, da bo prišlo do največjih odstopanj nivojev vode v tistih bazenih, ki imajo najmanjšo koristno prostornino in pri katerih je odstopanje pretočnih karakteristik največje. Že v poglavju 3.2 smo omenjali težave z izmerjenimi pretoki, ki postavljajo pod vprašaj verodostojnost pretočnih karakteristik ali površin bazenov, saj oboji vplivajo na spreminjanje nivoja vode v bazenu. Odstopanja pretokov se s časom poznajo kot polnjenje ali praznjenje bazenov. Polnjenje ali praznjenje bazenov ima preko nivojev vode v bazenih vpliv na padec, ki določa pretoke HE. Z daljšim časom opazovanja lahko pričakujemo vedno večja odstopanja, saj se zaradi večjega pritoka v bazen padec zmanjša, kar pa pri enaki zahtevani moči zahteva večji pretok, ki ponovno povratno vpliva na še hitrejše polnjenje bazena. Ker so bazeni verige DEM relativno mali, lahko v časovnem okvirju 24 ur pričakujemo prekoračitev dovoljenih nivojev vode v bazenih.

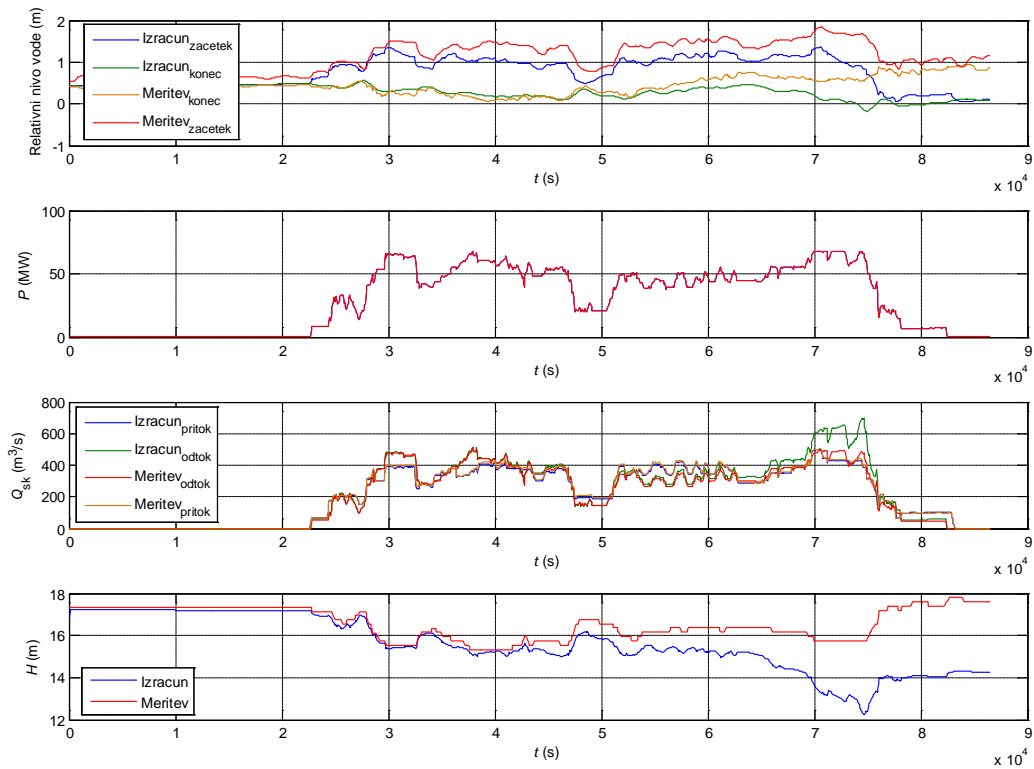
Na slikah 3.22 do 3.29 so prikazani rezultati preizkušanja modela verige DEM. Na slikah so za vsako HE prikazane primerjave med izračunanimi in izmerjenimi nivojema bazena, pretokov v bazen in iz bazena, ter padec vode. Časovni potek moči je bil pri izračunu enak kot so bile izmerjene vrednosti, zato je prikazan le za primerjavo s časovnim potekom pretoka, saj je njuna oblika zelo podobna.



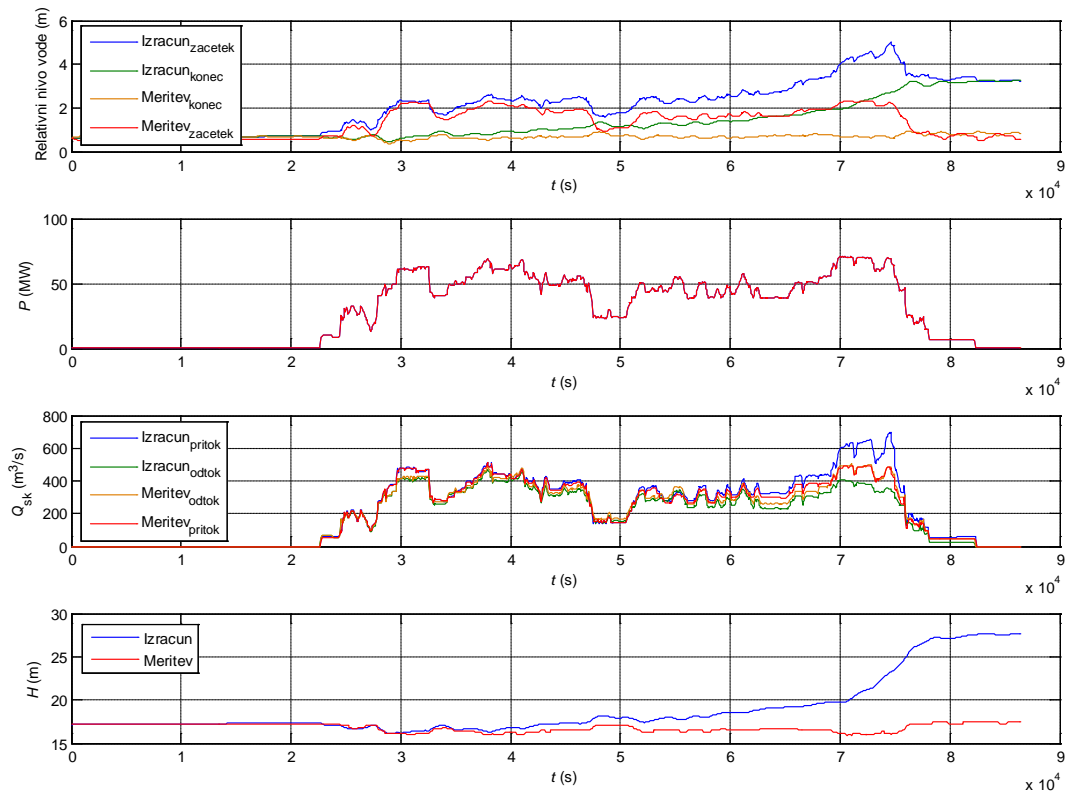
Slika 3.22: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Dravograd



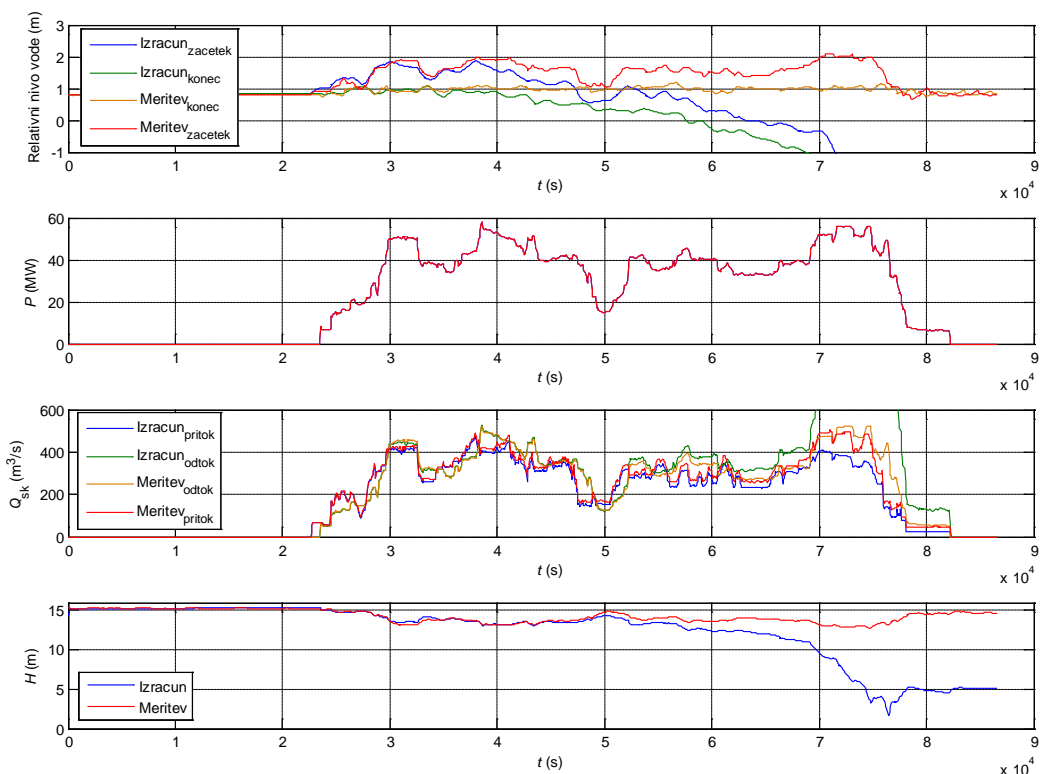
Slika 3.23: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Vuzenica



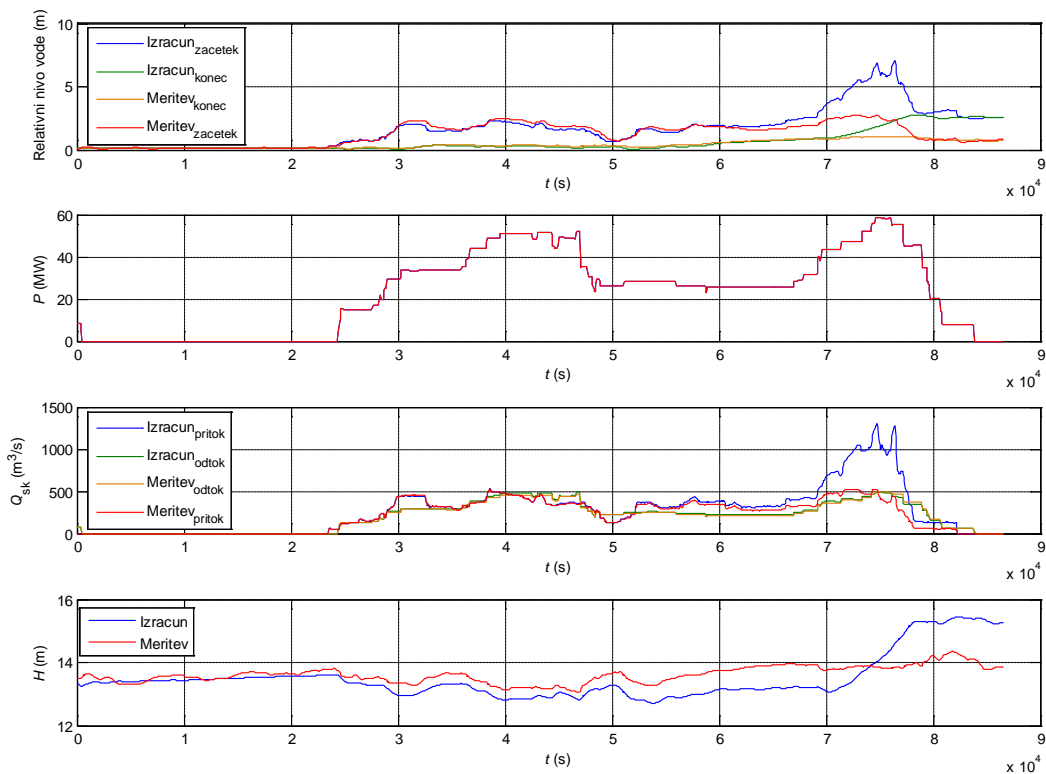
Slika 3.24: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Vuhred



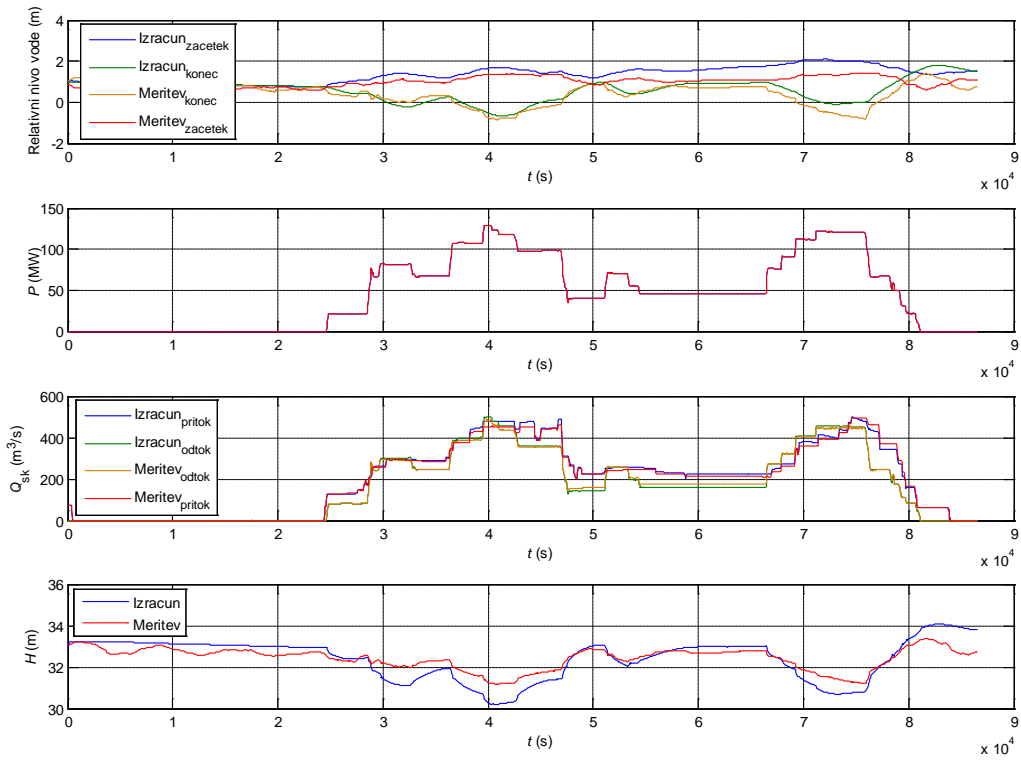
Slika 3.25: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Ožbalt



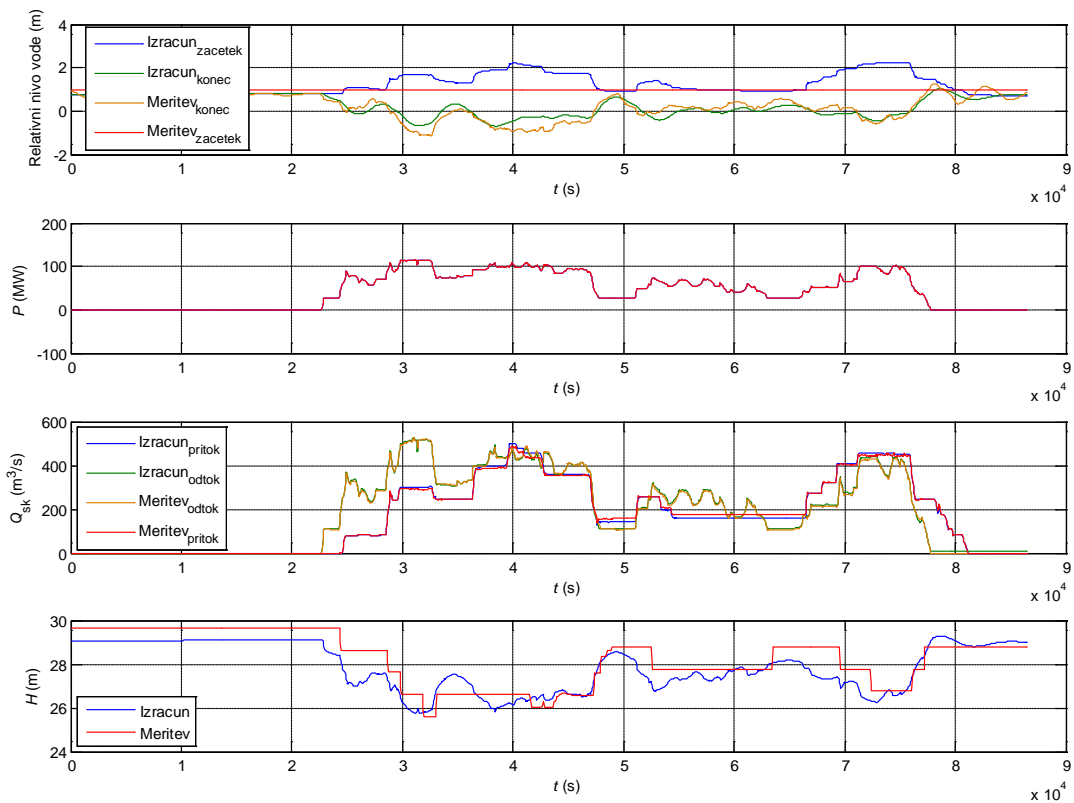
Slika 3.26: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Fala



Slika 3.27: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Mariborski otok



Slika 3.28: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Zlatoličje



Slika 3.29: Primerjava izmerjenih in izračunanih količin bazena HE Formin

Z daljšim časom opazovanja se je pojavilo vedno večje odstopanje izmerjenega in izračunanega nivoja vode na začetku in na koncu bazena. Z večanjem razlike nivoja vode se je spremenil padec. Sprememba padca je v primerjavi z izmerjenim padcem povzročila drugačno vrednost pretoka (večjo ali manjšo) od izmerjene vrednosti. Razlika pretoka je seveda povzročila polnjenje ali praznjenje bazena in posledično spremembo nivoja vode v bazenu. Zaradi povezanosti bazenov se opisani vpliv odstopanja nivojev vode v bazenih prenaša na ostale bazene in tako povzroča še večja odstopanja med izmerjenimi in izračunanimi nivoji. Zaradi medsebojnega vpliva bazenov je zato skoraj nemogoče ugotoviti, kateri od bazenov je imel največji vpliv na vedno večja odstopanja.

Na sliki 3.22 lahko opazimo naraščanje nivoja vode na koncu bazena HE Dravograd, kar pomeni naraščanje količine vode v bazenu. Dotok v omenjeni bazen je bil predhodno določen in je bil enak izmerjenemu pritoku na avstrijski HE Labot. Vendar smo že predhodno omenjali težave z meritvijo pretoka  $Q$ , ki ni izmerjen ampak je računana na podlagi izmerjene moči  $P$  in padca vode  $H$ . Zaradi omenjenih težav z meritvijo pretoka in zaradi nepoznavanja razmer na avstrijski HE Labot nam ni znano, kako natančni so podatki o pritoku v bazen HE Dravograd. Pri preizkušanju modela verige DEM smo zato morali uporabiti podatke o pretoku HE Labot, čeprav ne vemo natančno kolikšna so možna odstopanja od realnih vrednosti pretokov. Naraščanje količine vode v bazenu HE Dravograd je torej lahko posledica večjih izmerjenih pretokov HE Labot, ali pa so posledica odstopanja pretočne karakteristike HE Dravograd. Zaradi višanja nivoja vode v bazenu HE Dravograd se je povečal padec, ki je pri enaki moči zahteval manjši pretok in tako povzročil še hitrejše polnjenje bazena. Ta povratni vpliv je povzročil še večja odstopanja med izmerjenim in izračunanim nivojem vode v bazenu. Zaradi zmanjšanja pretoka HE Dravograd je v bazen HE Vuzenica pritekla manjša količina vode, ki je povzročila praznjenje bazena HE Vuzenica. Praznjenje bazena HE Vuzenica pa je še dodatno povečalo padec vode na HE Dravograd in s tem zmanjšalo njen pretok.

Največje odstopanje med izmerjenim in izračunanim nivojem vode v bazenu se je pojavilo pri bazenu HE Fala. Vzrok zato, da je največje odstopanje ravno pri bazenu HE Fala, sta predvsem najmanjša prostornina bazena in neugodne razmere. Neugodne razmere so posledica ravno nasprotnega časovnega poteka padca vode na HE Ožbalt in HE Fala. Na sliki 3.25 lahko opazimo višanje padca vode na HE Ožbalt, kar ima za posledico vedno

manjši pretok HE Ožbalt in s tem vedno manjši dotok v bazen HE Fala. Ravno nasprotno lahko opazimo na sliki 3.26, kjer se padec vode na HE Fala s časom znižuje. Znižanje padca vode je povzročilo povečanje pretoka HE Fala in s tem praznjenje bazena. Zmanjšanje pritoka in povečanje odtoka vode iz bazena HE Fala je povzročilo zelo hitro praznjenje bazena in zato zelo velika odstopanja med izmerjenima in izračunanima nivojema vode (slika 3.26). Manjše odstopanje nivojev vode bi dobili v primeru, ko bi se oba padca vode (HE Ožbalt in HE Fala) s časom hkrati zvišala ali pa znižala. V tem primeru se namreč vpliv odstopanj padcev vode kompenzira in je razlika pritokov in dotokov vode manjša.

Na podlagi rezultatov preizkušanja modela verige DEM lahko zaključimo, da je model verige DEM zelo težko preizkusiti, saj nimamo navoljo dovolj natančnih meritev. Že manjša odstopanja pretokov HE Labot namreč lahko povzročijo praznjenje ali polnjenje bazena HE Dravograd, ki nato vpliva na celotno verigo DEM. Prav tako niso poznani lokalni dotoki, ki lahko v daljšem časovnem obdobju predstavljajo velik vpliv na polnjenje bazenov. Izmerjeni pretoki HE niso dovolj natančni zaradi že omenjenih težav. Prav tako pa imajo vpliv na odstopanja nivojev vode v bazenih tudi pretočne karakteristike in površine bazenov. Pretočne karakteristike je sicer možno prilagoditi tako, da bi se rezultati izračunov in meritev ujemali. Težko pa je ugotoviti ali je vzrok za odstopanja med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi v modelu verige DEM ali pa v odstopanjih izmerjenih podatkov s katerimi smo preizkušali model. Najverjetneje je vzrok tako v odstopanju modela DEM, kot v izmerjenih podatkih. Na izmerjene podatke ne moremo vplivati, lahko pa korigiramo pretočne karakteristike, kar pa bi po obsežnosti potrebnega dela presegalo okvirje tega diplomskega dela. Zato lahko zgolj predpostavimo, da je model verige DEM ustrezen za izvedbo optimizacije obratovanja. Lahko pa s krajšim časovnim obdobjem optimiranja (manj kot 24 ur) zmanjšamo vpliv odstopanj med matematičnim modelom in realno verigo DEM.



## 4. PRIPRAVA VHODNIH PODATKOV ZA OPTIMIZACIJO

Priprava vhodnih podatkov je zraven modela verige DEM najpomembnejši in hkrati tudi najbolj obsežen del optimizacije obratovanja verige DEM. Za obsežnost priprav vhodnih podatkov optimizacije je vzrok predvsem v zelo velikem številu možnih rešitev optimizacije, o katerih smo podrobneje pisali v poglavju 2.2. Vhodni podatki optimizacije so vsi potrebni podatki za izračun modela verige DEM in podatki, ki jih zahteva optimizacija z genetskim algoritmom (GA). Tako lahko vhodne podatke razdelimo v dva dela:

1) Vhodni podatki za izračun modela:

- nivoji vode v bazenih (prostornine vode),
- vrednosti lokalnih pritokov,
- vrednosti pretokov prelivnih polj (prelivanja vode, biološki minimum),
- število ur obratovanja,
- časovni korak integracije in
- vrednosti napovedanih pritokov iz avstrijske HE Labot.

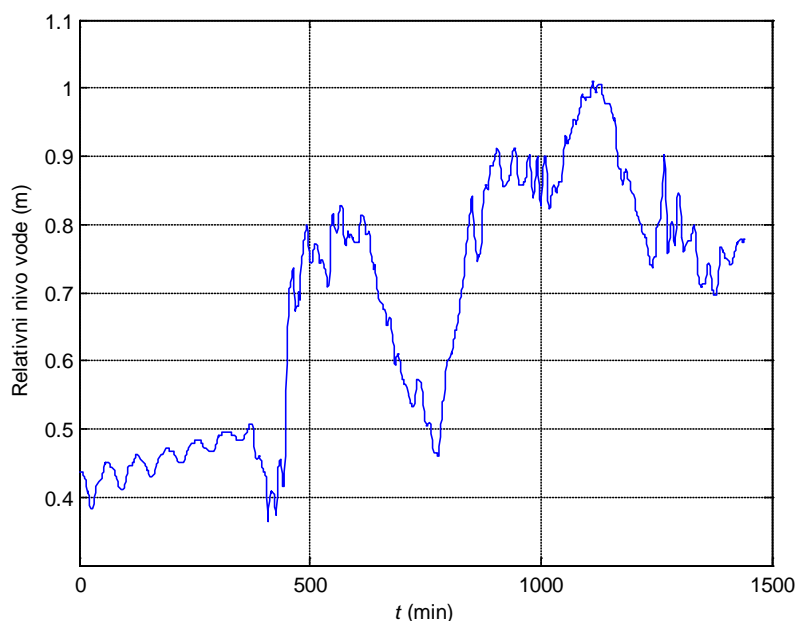
2) Vhodni podatki optimizacije:

- obratovalni diagram verige DEM (želene moči po urah),
- število razpoložljivih agregatov HE,
- število spremenljivk,
- omejitve spremenljivk in
- vsi ostali parametri GA.

Izmed naštetih vhodnih podatkov predstavljata določitev števila spremenljivk in določitev omejitev spremenljivk najboljše deli priprave podatkov, zato bosta predstavljeni v ločenih podpoglavjih.

### *Nivoji vode v bazenih*

Iz trenutnih vrednosti nivojev vode v bazenih ocenimo, kakšni so stacionarni nivoji vode v bazenih. Kljub neobratovanju HE v nočnih urah (približno 6 ur), se zaradi vztrajnosti vode nivoji vode nikoli povsem ne umirijo, ampak se voda pretaka iz začetka bazena proti koncu in obratno. Seveda se nihanje nivojev vode na začetku in na koncu bazena s časom umirja, vendar se v tako kratkem času ne umiri. Nivo vode v stacionarnem stanju je zato potrebno določiti iz srednje vrednosti nihanja nivojev vode v bazenu. Na sliki 4.1 je prikazan relativni nivo vode na koncu bazena HE Vuzenica. Opazimo lahko nihanje nivoja vode v bazenu v obdobju, ko HE ne obratujejo (čas od 0 do 400. minute). Potrebno je poudariti tudi veliko občutljivost določanja količine vode v bazenu na podlagi relativnega nivoja vode, saj se lahko le-ta spreminja le znotraj 1 m. Tako pomeni 1 cm spremembe nivoja vode 1 % celotne prostornine bazena, kar lahko pri večjih bazenih predstavlja precejšnjo količino vode.



Slika 4.1: Nihanje nivoja vode v bazenu HE Vuzenica v času neobratovanja HE

### *Vrednosti lokalnih pritokov*

O lokalnih pritokih smo podrobno pisali že na začetku 3. poglavja. Vrednosti lokalnih pritokov lahko imajo zelo velik vpliv v primeru optimiranja proizvodnje za večje število ur. Njihovo vrednost je zato potrebno čim bolj natančno predvideti, predvsem v primerih porasta lokalnih pritokov, ki imajo lahko velik vpliv na polnjenje bazenov. To je potrebno upoštevati predvsem v večernem obdobju, ko se načrtujejo količine vode v bazenih za naslednji dan. Prav lahko se zgodi, da je bazen po končanem obratovanju preveč poln in bi lahko v obdobju mirovanja HE lokalni dotoki prenapolnili bazen. Zato bi bilo potrebno nenačrtovano zagnati en agregat HE in tako preprečiti prekomerno polnjenje bazena ali pa višek vode preprosto preliti. Vrednost lokalnega pritoka se za vsak bazen posebej določi pred pričetkom optimizacije in je konstantna za celotno obdobje optimiranja proizvodnje. Lahko pa se model verige DEM spremeni in tako omogoči spreminjanje lokalnega pretoka po kakršni koli drugi funkciji.

### *Vrednosti pretokov prelivnih polj*

Prelivna polja so v osnovi namenjena predvsem prelivanju vode v primeru velikih naravnih dotokov, ko le ti presega kapacitete pretokov vseh agregatov HE. Izjema so prelivna polja bazena Zlatoličje in Formin, kjer se mora zaradi kanala prelivati del vode v staro stugo. V stari strugi se namreč mora ohranjati določen pretok biološkega minimuma, ki je določen z zakonom in je različen za poletni in zimski čas. Vrednosti pretokov prelivnih polj se določijo pred optimiranjem kot konstantne vrednosti in so konstantne za celotno obdobje optimiranja.

### *Število ur obratovanja*

Število ur obratovanja predstavlja časovno obdobje znotraj katerega iščemo optimalno rešitev obratovanja verige DEM. Kot je že bilo omenjeno v uvodu, je 24 ur najdaljši predvideni čas načrtovanja obratovanja verige DEM. Število ur obratovanja je predvsem pomembno za končni čas izračuna modela verige DEM.

### *Časovni korak integracije*

Časovni korak integracije je podatek za izračun modela verige DEM. S časovnim korakom integracije lahko zelo vplivamo na čas izračuna modela verige DEM. Potrebno se je zavedati, da v najslabšem primeru računamo obratovanje verige DEM za obdobje 24 ur. V 24 urah je 86400 sekund, kar bi pomenilo 86400 vmesnih izračunov vseh spremenljivk modela verige DEM, če bi bil časovni korak integracije 1 sekunda. To bi pomenilo zelo počasno računanje takšnega modela. Zato je potrebno izbrati dovolj velik časovni korak integracije, s katerim omogočimo hiter izračun modela, vendar časovni korak ne sme biti prevelik, saj se v tem primeru poveča numerična napaka. Že pri določanju modelov bazenov je bilo omenjeno, da se je 5 minut izkazalo kot najdaljši še dopustni in hkrati tudi priporočljivi časovni korak integracije. Časovni korak integracije lahko eventualno še zmanjšamo, vendar ni smiselno uporabiti krajšega od 1 minute.

### *Vrednosti napovedanih pritokov iz avstrijske HE Labot*

Zadnja avstrijska HE Labot mora DEM posredovati planirane pretoke za naslednjih 24 ur. Podobno mora DEM posredovati predvidene pretoke zadnje HE Formin prvi HE na Hrvaškem. Na podlagi predvidenih pretokov iz Avstrije, lahko DEM planira svojo obratovanje HE. Pravilno napovedani pretoki s strani HE Labot imajo zelo pomembno vlogo pri kratkoročni optimizaciji obratovanja, saj njihova naknadna sprememba pomeni popolno spremembo obratovalnih diagramov HE. Vsaka sprememba napovedanih avstrijskih dotokov pomeni ponovni izračun optimizacije, s čimer se še bolj potrdi potreba po čim hitrejšem izračunu optimizacije verige DEM, predvsem za krajša časovna obdobja. Hkrati pa je to tudi glavni vzrok, zakaj ni smiselno optimirati obratovanja verige DEM za daljše časovno obdobje. V obdobju 24 ur se zgodi preveč sprememb, ki zahtevajo ponovni izračun optimizacije. Krajše časovno obdobje optimiranja pa daje veliko prednost optimiranju proizvodnje z uporabo natančnega modela verige DEM, kot je predstavljen v tem diplomskem delu.

Vrednosti napovedanih pretokov so zapisane v obliki konstantnih vrednosti pritokov znotraj ene ure za vseh 24 ur. Tabela konstantnih vrednosti pritokov spremenimo v zaporedje, ki predstavlja prtok vode v bazen HE Dravograd. Pritok iz Avstije je v obliki zaporedja vrednosti pretokov zapisan v skrajnem levem bloku na sliki 3.21.

### *Obratovalni diagram verige DEM*

Obratovalni diagram verige DEM je sestavljen iz tabele, v kateri so za posamezno uro obratovanja vpisane vrednosti skupne moči verige DEM. Primer obratovalnega diagrama je že bil predstavljen na sliki 2.1.

### *Število razpoložljivih agregatov HE*

Število razpoložljivih agregatov ene HE določa maksimalno in minimalno moč HE. Vseh osem hidroelektrarn ima znotraj HE enake agregate, kar omogoča enostaven način izračuna maksimalne in minimalne moči HE. Minimalna moč HE se spremeni le takrat, kadar nobeden od agregatov ni razpoložljiv. Takšen primer je praktično skoraj nemogoč, zaradi tega število razpoložljivih agregatov vpliva predvsem na maksimalno moč HE. Maksimalno moč HE torej dobimo, če maksimalno moč enega agregata pomnožimo s številom razpoložljivih agregatov.

## **4.1 Določitev števila spremenljivk**

Že v podpoglavju 2.2 je bilo omenjeno, kolikšno je največje možno število spremenljivk (192) in kaj predstavlja ena spremenljivka (moč ene HE v eni uri obratovanja). V tem podpoglavju bo zato podrobneje opisana možnost zmanjševanja števila spremenljivk, kar lahko prispeva h krajšemu času izračuna optimizacije.

Na število spremenljivk vpliva predvsem zeleno obdobje, za katerega želimo izračunati optimalno porazdelitev zelenih moči DEM na posamezne HE. Splošno smo se omejili na največ 24 ur obratovanja, kar znaša pri 8 HE 192 spremenljivk. Manjše kot je število ur obratovanja, manjše je tudi število spremenljivk. Vendar pa je potrebno upoštevati, da na število spremenljivk znotraj ene ure obratovanja vpliva tudi skupna zelena moč verige DEM. Ravno na podlagi tega dejstva lahko zmanjšamo število spremenljivk. Če je zelena skupna moč vseh HE zelo mala, ni smiselno iskati možnosti razporeditve te moči na vseh osem HE. Če je skupna zelena moč recimo 15 MW, te moči niti ne moremo dodeliti HE Zlatoličje ali Formin, saj je njuna minimalna moč večja od zahtevane moči. Zato moramo v tej uri obratovanja moč obeh HE postavimo na nič in tako ti dve HE pri optimizaciji ne predstavljata spremenljivke. Prav tako pa ni smiselno iskati

tako male zelene moči na preostalih šestih HE, saj je njihova skupna minimalna moč 37 MW. Iz tega lahko sklepamo, da bodo tudi nekatere od preostalih šestih HE morale imeti moč nič in tako ne bodo obravnavane kot spremenljivke. Prav tako pa obstaja na DEM stalna praksa, da običajno ponoči obratuje zgolj HE Dravograd z največ enim agregatom. To ima za posledico dodelitev malih skupnih zelenih moči samo na HE Dravograd. Iz tega lahko sklepamo, da se bo pri tako mali skupni zeleni moči ta moč dodelila samo HE Dravograd, zato bodo ostale HE imele moč nič in ne bodo predstavljale spremenljivk. Prav tako pa v takem primeru moč HE Dravograd ne predstavlja spremenljivke, saj je njena moč že definirana z zeleno močjo. Zaradi takšnih in drugačnih omejitev, smo naredili analizo skupnih zelenih moči, ki omogočajo zmanjševanje števila spremenljivk. Skupne zelene vrednosti moči smo razdelili v štiri skupine (tabela 4.1).

Tabela 4.1: Odvisnost števila spremenljivk od zelene vrednosti moči v obdobju ene ure

$P$ (MW)		Št. spremenljivk
$P_{sk} = 0$	HE ne obratujejo	0
$3 \leq P_{sk} \leq 10$	obratuje le HE Dravograd	0
$10 < P_{sk} \leq 80$	obratuje lahko le prvih 5 HE	5
$80 < P_{sk}$	obratujejo lahko vse HE	8

V tabeli 4.1 so prikazani štirje pogoji, po katerih se razvrstijo skupne zelene moči. Pri tem je potrebno poudariti, da tretji in četrti pogoj omogočata razporeditev zelene moči na prvih pet oziroma osem HE, kar pa ni nujno. Obstaja namreč možnost, da se zelena moč razporedi na samo eno od petih ali eno od osmih HE, pri tem so moči ostalih HE nič. Tretji pogoj torej omogoča iskanje rešitve znotraj prvih petih HE, hkrati pa ne zapoveduje, da mora vsaka od petih HE prevzeti del zelene moči in s tem biti v obratovanju.

S takšno analizo skupnih zelenih moči lahko zmanjšamo število spremenljivk in število potencialnih možnih rešitev, ne da bi s tem preveč grobo vplivali na obratovanje verige DEM. Lahko se namreč zgodi, da je neka zelena moč znotraj tretjega pogoja (tabela 4.1), kjer ni predvideno obratovanje zadnjih treh HE, bi pa bila najbolj optimalna rešitev ravno z obratovanjem zadnjih treh HE.

Eden od vzrokov zakaj smo pri malih zelenih močeh razporedili moči ravno na začetne HE je tudi v tem, ker so te male moči običajno na začetku obratovalnega diagrama (od 6 do 12 ure), in s tem omogočimo polnjenje bazenov na koncu verige HE. Takšna predpriprava bazenov namreč omogoča večje obratovalne moči v naslednjih urah, ko so skupne zelene moči večje.

## 4.2 Določitev omejitve spremenljivk

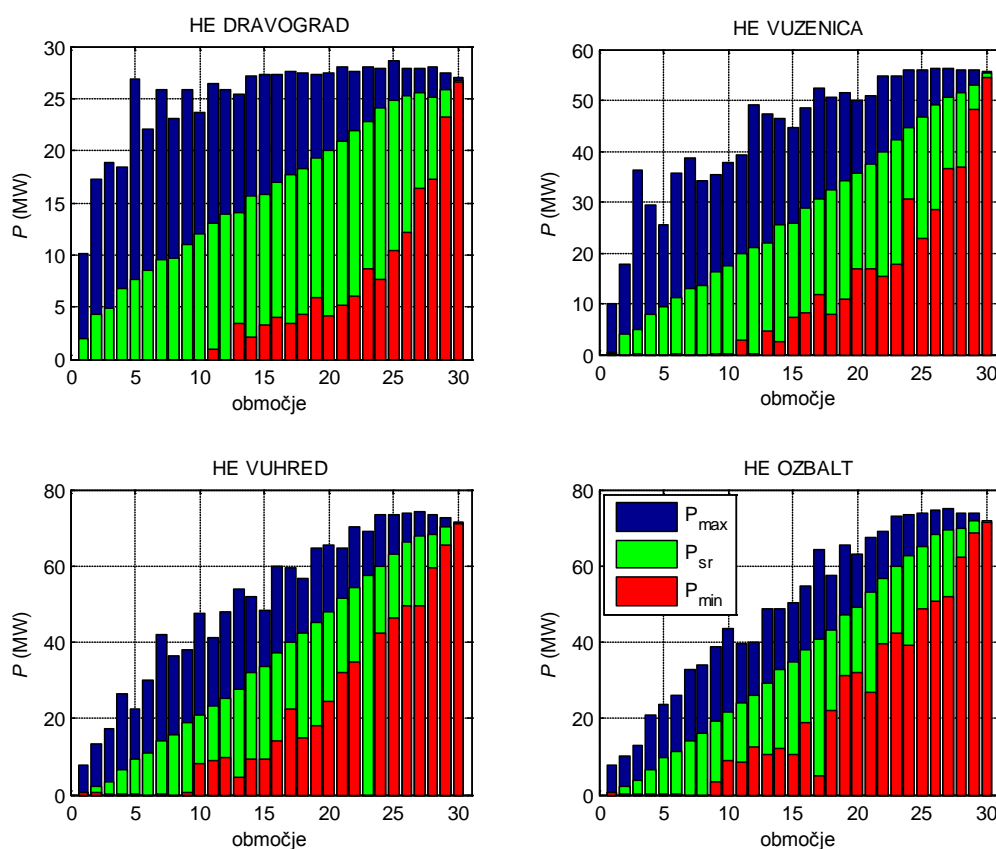
Omejitve spremenljivk so v osnovi določene z minimalnimi  $P_{\min}$  in maksimalnimi  $P_{\max}$  močmi HE, pri katerih je potrebno upoštevati tudi zaustavitev HE ( $P = 0$  MW). Več o tem je bilo opisano že na začetku poglavja 2.2, zato bodo v tem podpoglavju opisani predvsem postopki za zmanjševanje števila potencialnih možnih rešitev optimizacije.

V eni opazovani uri obratovalnega diagrama lahko v najbolj neugodnem primeru nastopa 8 spremenljivk. Omejitve spremenljivk so v osnovi določene z minimalnimi in maksimalnimi močmi HE in bi bilo edino pravilno, da bi takšne omejitve upoštevali tudi pri optimizaciji obratovanja verige DEM. Vendar smo že v poglavju 2.2 pisali o maksimalnih možnih kombinacijah, ki so potencialne možne rešitve optimizacije in katerih število je ekstremno veliko in sicer več kot  $1 \cdot 10^{109}$ , pri spreminjanju moči HE po koraku 5 MW. Zato smo prisiljeni zmanjšati število možnih rešitev, ampak pri tem ne smemo preveč posegati v celotno optimizacijo. S pravilno postavitvijo omejitev spremenljivk lahko izločimo precejšen del možnih rešitev, za katere lahko trdimo, da ne predstavljajo optimalnih rešitev optimizacije. To lahko trdimo predvsem zaradi vrste omejitev pri obratovanju DEM, kot na primer spreminjanje nivoja vode za 1m, največja sprememba nivoja 20 cm/h.

Da bi kar najbolj učinkovito zmanjšali število potencialno možnih rešitev optimizacije in hkrati ne bi preveč vplivali na samo optimizacijo, smo analizirali obratovanje verige DEM v obdobju enega leta. Iz izmerjenih urnih povprečij moči iz obdobja enega leta, smo naredili analizo obratovanja vseh HE in njihovih skupnih moči. Za analizo tako dolgega obdobja obratovanja smo se odločili zato, ker lahko le v obdobju enega leta zajamemo vse možne hidrološke razmere. Pri tem je mišljeno predvsem sušno obdobje z malimi naravnimi dotoki in obdobje z veliki naravnimi dotoki v jesenskem času.

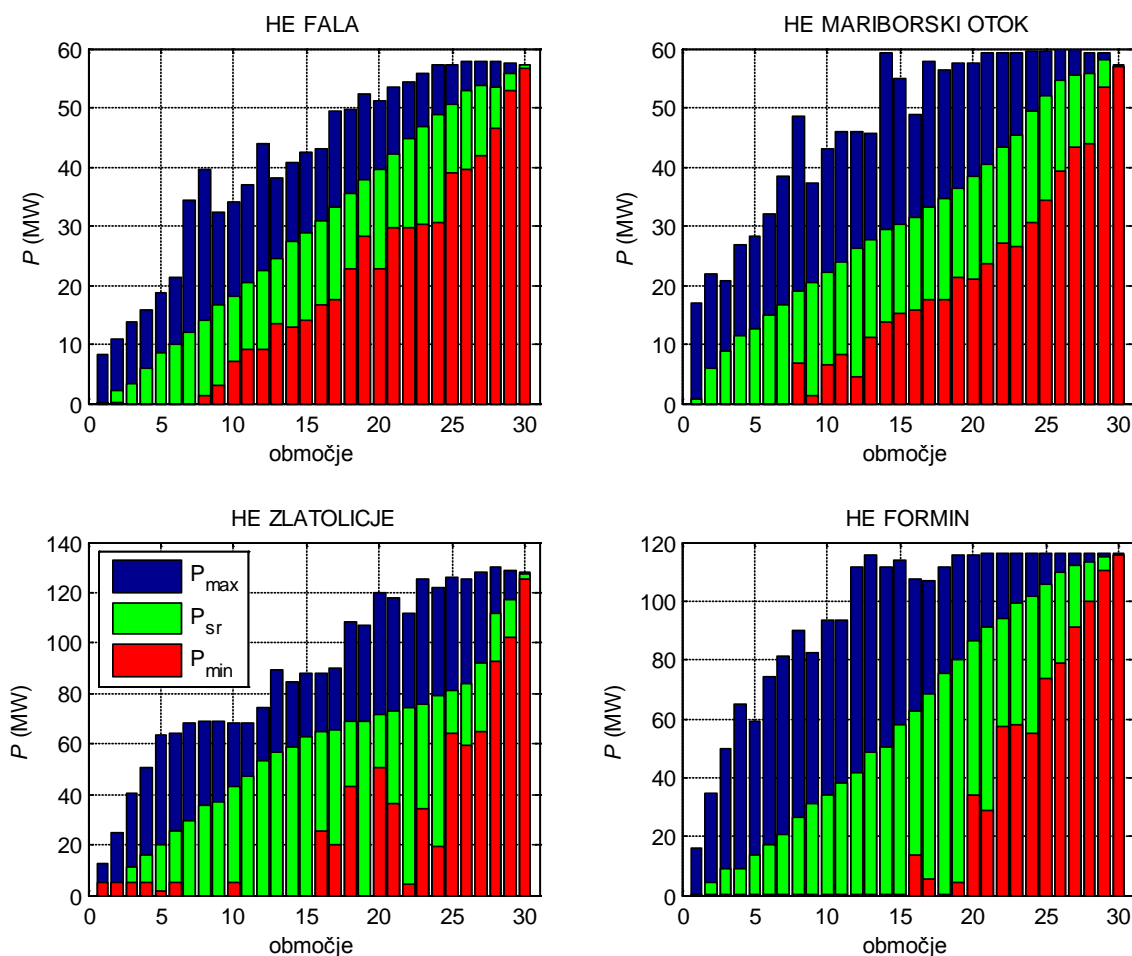
Zaradi analize letnega obdobja obratovanja verige DEM, smo bili prisiljeni uporabiti izmerjene podatke moči HE, ki so urna povprečja. To je predvsem posledica prevelikega števila izmerjenih podatkov in pa dejstva, da sploh ni možno dobiti minutnih povprečij izmerjenih moči za obdobje enega leta. Za primerjavo rezultatov smo opravili tudi analizo podatkov minutnih povprečij izmerjenih moči za obdobje enega dne. Rezultati analize minutnih povprečij so bili zelo podobni rezultatom analize urnih povprečij.

Analizo izmerjenih urnih povprečij moči smo naredili tako, da smo celotni razpon moči DEM (od 0 do 600 MW) razdelili na 30 območij po 20 MW. Tako recimo sedmo območje predstavlja moči od 120 MW ( $20 \cdot (7-1)$ ) do 140 MW ( $20 \cdot 7$ ). Za vsako uro obratovanja smo izračunali skupno moč vseh HE. Nato smo glede na območje v katerega je spadala skupna moč vseh HE, v to območje razvrstili tudi moči posameznih HE (posebej za vsako HE). Za posamezno HE smo lahko za vsako od tridesetih območij poiskali in izrisali minimalno in maksimalno moč ter srednjo vrednost moči, kar je prikazano na slikah 4.2 in 4.3.



Slika 4.2: Minimalne, maksimalne in srednje vrednosti moči znotraj posameznih območij



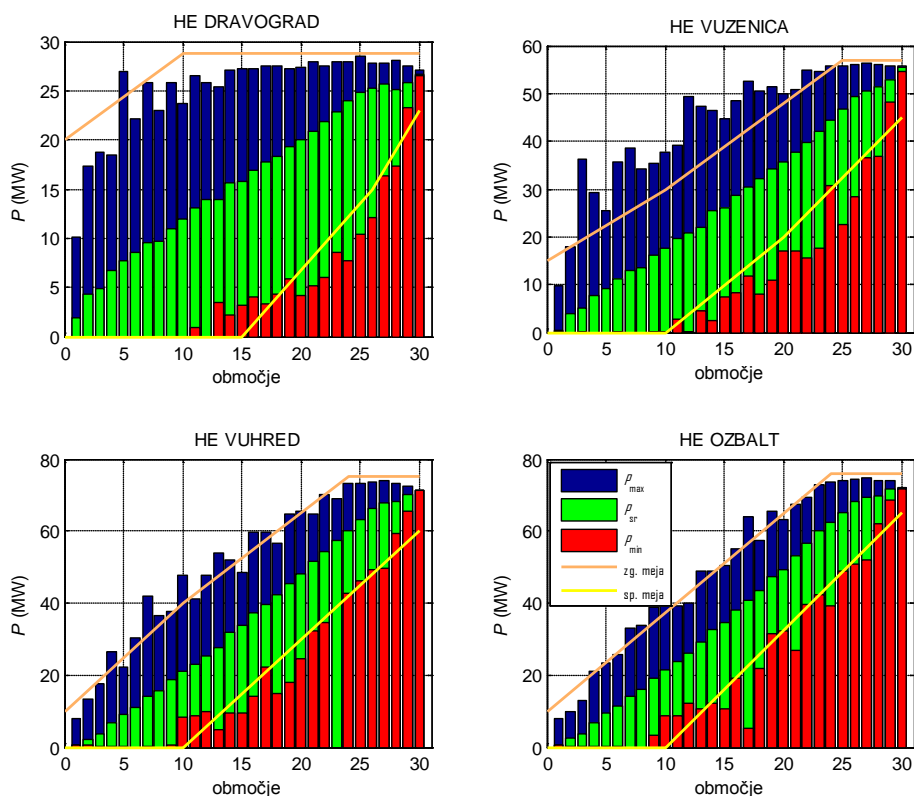


Slika 4.3: Minimalne, maksimalne in srednje vrednosti moči znotraj posameznih območij

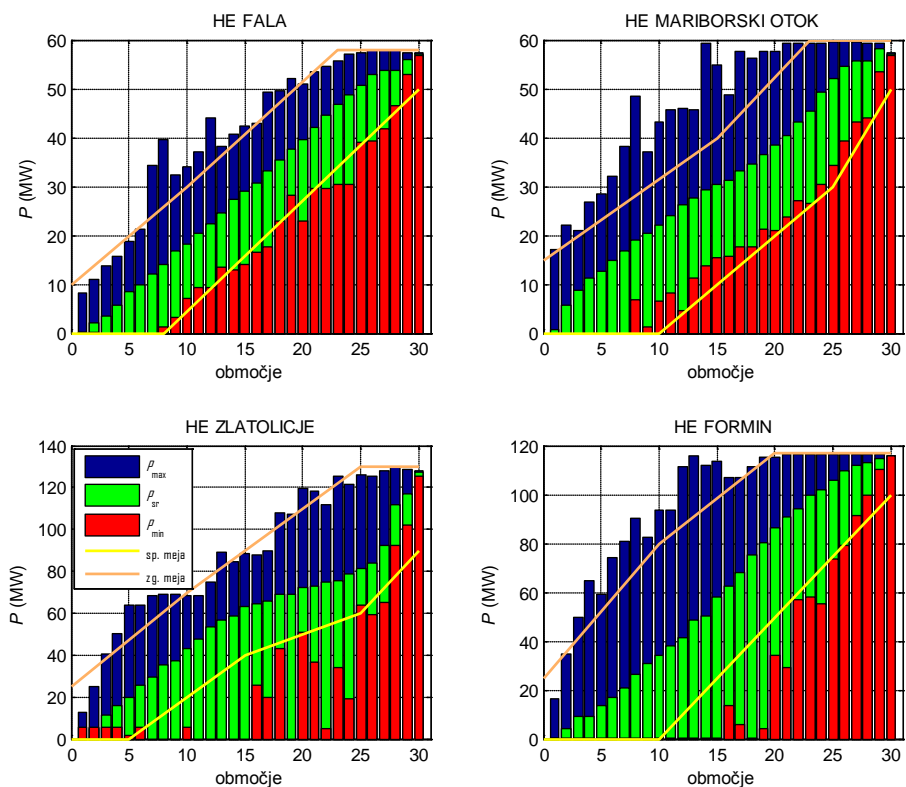
Na slikah 4.2 in 4.3 so na x osi označena območja na katera smo razdelili celotni razpon moči verige DEM. Na y osi so označene moči HE. Modri stolpec znotraj enega območja predstavlja maksimalno moč HE, ki se je pojavila takrat, ko je skupna moč celotne verige DEM spadala v to območje. Rdeči stolpci predstavljajo minimalne moči znotraj posameznih območij, med tem ko zeleni stolpci predstavljajo srednjo vrednost vseh moči znotraj izbranega območja. Če pogledamo primer območja 10, HE Fala, lahko razberemo vrednost modrega stolpca približno 35 MW in rdečega stolpca približno 7 MW. Ker območje 10 predstavlja skupne moči verige DEM od 180 do 200 MW, pomeni, da takrat, ko je bila skupna moč celotne verige DEM znotraj tega območja, HE Fala ni imela urne povprečne moči nikoli večje od 35 MW in nikoli manjše od 7 MW.

Pri optimizaciji torej ni smiselno uporabiti omejitve spremenljivk, ki bi bila enaka njihovemu celotnemu razponu moči, ampak glede na rezultate opravljene analize s slike 4.2 in 4.3. Na obeh omenjenih slikah lahko opazimo enakomerno naraščanje srednjih vrednosti moči (zeleni stolpci), od območja 1 do območja 30. Podobne poteke imajo tudi minimalne in maksimalne moči, ki so le z določeno vrednostjo moči odmaknjenje od srednje vrednosti moči in tako tvorijo območje znotraj katerih so razporejene vse moči enega območja. Minimalne in maksimalne moči so sicer precej bolj razpršene po celotnem razponu moči verige DEM, saj te vrednosti predstavljajo zgolj eno samo vrednost, medtem ko je srednja vrednost vezana na vse izmerjene moči znotraj enega območja. Zato lahko minimalne in maksimalne moči obravnavamo bolj z rezervo, saj so lahko te moči tudi posledice napak pri meritvi. Prav tako pa je potrebno upoštevati predvsem pri minimalnih močeh, da gre za urna povprečja. Pri minimalnih močeh se namreč pojavlja težava zaustavitve HE. Če je HE delovala recimo polovico ure z neko konstantno močjo, nato pa se je HE zaustavila in je v naslednje pol ure bila izmerjena moč nič, je urna povprečna moč zelo mala. Pri analizi moči pa se je ta mala povprečna moč izkazala kot najmanjša iz celotne množice izmerjenih moči v enem območju in tako ni najboljši predstavnik minimalne moči svojega območja. Zaradi omenjenih težav lahko vzamemo še ožja območja, znotraj katerih se lahko gibljejo posamezne spremenljivke.

Na podlagi modrih in rdečih stolpcev oziroma maksimalnih in minimalnih moči znotraj posameznih območij s slik 4.2 in 4.3 smo določili meje, znotraj katerih se lahko gibljejo spremenljivke oziroma moči HE. Na slikah 4.4 in 4.5 so omenjene meje označene z rjavimi in rumenimi črtami. Rjave in rumene črte so zgolj linearno povezane točke, ki smo jih predhodno določili in na podlagi katerih se z interpolacijo izračunajo omejitve spremenljivk optimizacije obratovanja verige DEM. Kot lahko opazimo na slikah 4.4 in 4.5, so omejitve postavljene precej ožje od celotnega razpona moči posamezne HE, s čimer smo celotni razpon moči zmanjšali na manj kot polovico ali celo tretjino celotnega razpona moči. Seveda pa lahko po potrebi omejitve spremenljivk pomikamo in tako dosežemo še ožja ali širša omočja, znotraj katerih se lahko gibljejo spremenljivke, oziroma moči HE (rezultati optimizacije). S tem ukrepom smo precej zmanjšali število potencialnih možnih rešitev optimizacije in tako omogočili večjo verjetnost, da dosežemo globalni optimum v čim krajšem času.



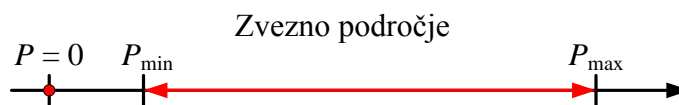
Slika 4.4: Omejitve maksimalnih in minimalnih moči HE



Slika 4.5: Omejitve maksimalnih in minimalnih moči HE

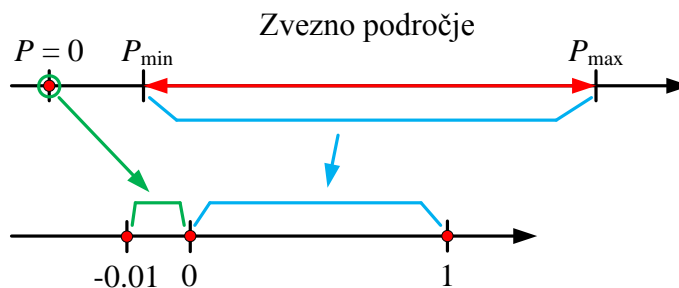
### 4.3 Normiranje spremenljivk

V prejšnjem poglavju smo govorili o omejitvah spremenljivk, ki določajo zgornjo in spodnjo vrednost moči, znotraj katere se lahko spremenljivka nahaja. Ker so spremenljivke moči HE v času ene ure, katerih razpon moči ni povsem zvezen, nastanejo težave pri postavitvi omejitve spremenljivk v GA. Razpon moči je zvezen samo med minimalno  $P_{\min}$  in maksimalno močjo  $P_{\max}$ , ne pa tudi med  $P = 0$  MW in  $P_{\min}$ . Med slednjima je namreč nedovoljeno stanje HE, kot je to prikazano na sliki 4.6.



Slika 4.6: Razpon moči HE z nedovoljenim stanjem med  $P = 0$  in  $P_{\min}$

Pri GA [4], ki je del programa MATLAB, lahko podamo omejitve spremenljivk zgolj z določitvijo minimalne in maksimalne vrednosti, znotraj katere se lahko spremenljivka nahaja. V našem primeru pa imamo vmesno področje, kjer se spremenljivka ne sme nahajati. Ena od možnosti je ta, da v naprej določimo, katere HE obratujejo in zato morajo prevzeti del skupne želene moči. V tem primeru ne potrebujemo stanja zasutavitve HE, saj že v naprej določimo katere HE obratujejo in katere ne. Boljši način pa je z normiranjem spremenljivk, pri katerem vsak razpon moči HE preslikamo v novo področje, ki leži med 0 in 1. Neobratovanje HE pa preslikamo v področje med -0.01 in 0, kot je prikazano na sliki 4.7



Slika 4.7: Preslikava področja obratovanja HE na novo področje

Na opisani način se izognemo nedovoljenemu območju moči HE, hkrati pa dovolimo zaustavitev HE, če se to izkaže kot optimalna rešitev. Potrebno pa je poudariti, da se lahko področje namenjeno neobratovanju HE poljubno poveča ali zmanjša. Območje neobratovanja HE ni predvideno za vsako spremenljivko, ampak samo za tiste, pri katerih je v osnovnih omejitvah (v obliki moči) spodnja meja moči nižja od  $P_{\min}$ . Omejitve spremenljivk so v GA podane kot 1 za zgornjo mejo in 0 ali -0.01 za spodnjo mejo. Ustrezni preračun moči se nato izvede v ocenitveni funkciji, kjer se območje 1 preračuna v zgornjo mejo moči, ter 0 ali -0.01 v spodnjo mejo moči, za vsako HE posebej. Če se spremenljivka nahaja znotraj območja med -0.01 in 0, se vzame moč  $P = 0$  MW, če pa med območjem 0 in 1, se izračuna ustrezna moč HE.

## 5. OSNOVNI PRINCIP OPTIMIZACIJE

### 5.1 Genetski algoritem

Optimizacija obratovanja verige DEM temelji na GA, ki spada med stohastične (naključne) preiskovalne metode in temelji na Darwinovi teoriji razvoja živih bitij. Na omenjeni teoriji so razviti tudi njeni osnovni operatorji, kot so selekcija, križanje in mutacija. Namen operatorjev je spreminanje osnovne populacije osebkov tako, da se iz generacije v generacijo razvijajo boljši osebki populacije. Osebki populacije predstavljajo potencialne rešitve optimizacijskega problema in so sestavljeni iz množice optimizacijskih spremenljivk. Uspešnost posameznega osebka populacije podaja ocenitvena funkcija (angleško fitness function). Z ocenitveno funkcijo določimo večjo uspešnost boljšim osebkom in manjšo slabšim osebkom. GA na podlagi uspešnosti posameznega osebka s pomočjo operatorjev selekcije, križanja in mutacije določi novo generacijo osebkov, ki so potomci predhodne generacije. Operator selekcije na podlagi uspešnosti posameznih osebkov izbere tiste, ki se bodo prenesli v naslednjo generacijo. Pri tem se običajno vsaj eden izmed boljših osebkov neposredno prenese v naslednjo generacijo. Neposredni prenos tako imenovanih elitnih osebkov omogoča prenos dobre genetske osnove v naslednje generacije. Obstajajo različne metode selekcije oziroma izbire, katerim je skupno predvsem to, da imajo osebki z večjo uspešnostjo večjo verjetnost za preživetje kot pa manj uspešni osebki. Novo dobljeno populacijo osebkov se nato podvrže operatorju križanja, katerega glavni namen je izmenjava genetskega materiala osebkov. Tudi v tem primeru obstajajo različne metode križanja osebkov. Populacijo osebkov se nato podvrže še operatorju mutacije, katerega namen je naključno spremeniti genetsko osnovo osebka. Z naključno spremembo osebkov populacije zagotavljamo globalno preiskavo problemskega prostora in tako preprečimo, da bi optimizacija zašla v lokalni optimum. Običajno imamo na voljo tudi parameter, s katerim določimo kolikšen delež nove populacije bo sestavljen iz osebkov dobljenih s križanjem in preostali del osebkov določen z mutacijo. Hkrati pa

določimo tudi število elitnih osebkov populacije. Novo generacijo osebkov, ki so potomci prejšnje generacije, ovrednotimo z ocenitveno funkcijo in jih nato ponovno podvržemo vsem omenjenim operatorjem GA. Postopek se nato ponavlja iz iteracije v iteracijo, dokler ni izpolnjen eden izmed zaustavitvenih pogojev. Pogojev zaustavitve optimizacije je lahko več. Izračun optimizacije se konča, če se doseže dovoljeni čas izračuna, če se doseže podano število generacij ali če se v določenem številu generacij ne doseže boljši rezultat optimizacije.

Opisani način delovanja GA predstavlja najbolj osnovni princip delovanja GA, kot je v blokovni shemi prikazano na sliki 5.1. Sicer obstajajo še različne funkcije, ki se uporabljajo znotraj GA (migracija, hibridna funkcija, itd), ki jih ne bomo posebej omenjali.



Slika 5.1: Blokovna shema genetskega algoritma

V naslednjem podpoglavju bo podrobneje opisana ocenitvena funkcija, s katero ovrednotimo osebe populacije (slika 5.1, rdeči blok).

## 5.2 Ocenitvena funkcija

GA z ocenitveno funkcijo oceni uspešnost posameznega osebka populacije. GA vedno poskuša zmanjšati rezultat ocenitvene funkcije na čim manjšo vrednost ( $-\infty$ ). Zaradi tega imajo najbolj uspešni osebki manjšo oceno od neuspešnih osebkov. Ocenitveno funkcijo je torej potrebno podati tako, da bodo osebki, ki bodo najbolj ustrezali našim zahtevam imeli nižjo oceno od ostalih. To lahko dosežemo na različne načine, odvisno od naših zahtev. V našem primeru smo želeli zagotoviti optimalno razporeditev skupnih zelenih moči na posamezne HE, zato moči HE predstavljajo spremenljivke optimizacije. Zahtevana skupna moč verige DEM bo najbolj optimalno razporejena po vseh HE takrat, ko bo ta skupna zelena moč dosežena z najmanj porabljene vode. Najbolj idealno bi namreč bilo, če bi lahko HE zagotovile zelene moči brez pretoka. V realnosti pa lahko HE zagotavlja določeno vrednost moči le z določenim pretokom vode, zato bo v času obratovanja verige DEM vsota integralov vseh pretokov HE imela določeno pozitivno vrednost (enačba 5.1). Vsota integralov pretokov HE je eden od možnih kriterijev, s katerim lahko ocenimo uspešnost osebkov populacije. Uspešnejši osebek populacije bo tisti osebek, ki bo imel čim manjšo vrednost vsote integralov pretokov (enačba 5.1). V enačbi je  $t_0$  začetni čas in  $t_k$  končni čas obratovanja verige DEM, pretok  $q_i$  pa je pretok posamezne HE. Črke spremenljivke *VIP* pomenijo prve črke besed: vsota integralov pretokov.

$$VIP = \sum_{i=1}^8 \left( \int_{t_0}^{t_k} q_i(t) dt \right) \quad (5.1)$$

Vsota integralov pretokov vseh HE je bil eden izmed možnih kriterijev, s katerim smo definirali ocenitveno funkcijo GA. Na ta način je GA iskal takšne moči posameznih HE, da je hkrati zagotovil zeleni obratovalni diagram verige DEM in je za doseganje teh moči bila porabljena čim manjša količina vode. Vendar je potrebno pri iskanju optimalnih razporeditev moči upoštevati tudi omejitve. Zato je bilo potrebno z ocenitveno funkcijo določiti kaj vse je sprejemljivo in kaj ne. V primeru obratovanja verige DEM se morajo moči HE nahajati znotraj dovoljenih meja, kar smo že zagotovili z omejitvijo spremenljivk. Prav tako nivoji vode v bazenih ne smejo prekoračiti zgornje ali spodnje meje. Omejitve je potrebno podati tudi za pretoke HE, saj se pri izračunu modela lahko zgodi, da je



izračunani pretok večji od realnih vrednosti. Glede na vse omenjene omejitve smo pri ocenitveni funkciji uporabili pravila (sankcije), s katerimi kaznujemo tiste osebke, pri katerih se pojavijo prekoračitve dovoljenih vrednosti nivojev in pretokov. Prekoračitve omejitev je potrebno ustrezno ovrednotiti. Ocenitvena funkcija mora biti le ena sama vrednost, ki podaja oceno uspešnosti posameznega osebka populacije. Končno oceno uspešnosti je potrebno izračunati iz različnih vrednosti, ki jih sestavljajo posamezne sankcije (5.2).

$$Ocena = VIP + sankcija_1 + sankcija_2 + \dots + sankcija_i \quad (5.2)$$

Prekoračitve ovrednotimo tako, da imajo največje kršitve največjo težo pri določanju ocene. V našem primeru prekoračitve nivojev vode v bazenih predstavljajo največjo kršitev in imajo zato največjo težo pri določanju ocene uspešnosti osebkov. V primeru prekoračitve dovoljenih nivojev vode nas vrednost vsote integralov pretokov HE niti ne zanima, saj je za nas takšno stanje povsem nesprejemljivo. Optimizacija mora torej najprej poiskati osebke brez sankcij, šele nato pa se prične bistvo optimizacije, to je iskanje optimalnih razporeditev moči HE.

Pogosto nas niti ne zanima optimalno obratovanje verige DEM v takšnem smislu kot je bilo predhodno omenjeno. Omenjeni način obratovanja namreč lahko povzroči neugodno stanje količin vode v bazenih po končanem dnevnem obratovanju (slab začetni pogoj za nadaljno obratovanje). Zato pogosto želimo zagotoviti želeni obratovalni diagram verige DEM na ta način, da bo po določenem časovnem obdobju v bazenih vnaprej določena količina vode. Na ta način voda v bazenih ne bo optimalno izkoriščena, bodo pa dani ustrezni začetni pogoji za nadaljno obratovanje HE. V tem primeru se spremeni ocenitvena funkcija tako (enačba 5.3), da sankcioniramo odstopanje količin vode v bazenih po končanem časovnem obdobju. V enačbi 5.3 je  $\Delta V_i$  odstopanje prostornine posameznega bazena (v stacionarnem stanju) in  $k_i$  ustrežna utežitev, s katero lahko določimo večjo prioriteto določenim bazenom. Z izbiro večje prioritete lahko zagotovimo dovolj vode v bazenih HE, ki imajo večjo nazivno moč. Predhodno sta bila opisana zgolj dva načina iskanja optimalne porazdelitve skupne želene moči, ki smo ju uporabili v tem dimplomskem delu, seveda pa obstajajo tudi druge možnosti.

$$Sankcija = \sum_{i=1}^8 (\Delta V_i \cdot k_i) \quad (5.3)$$

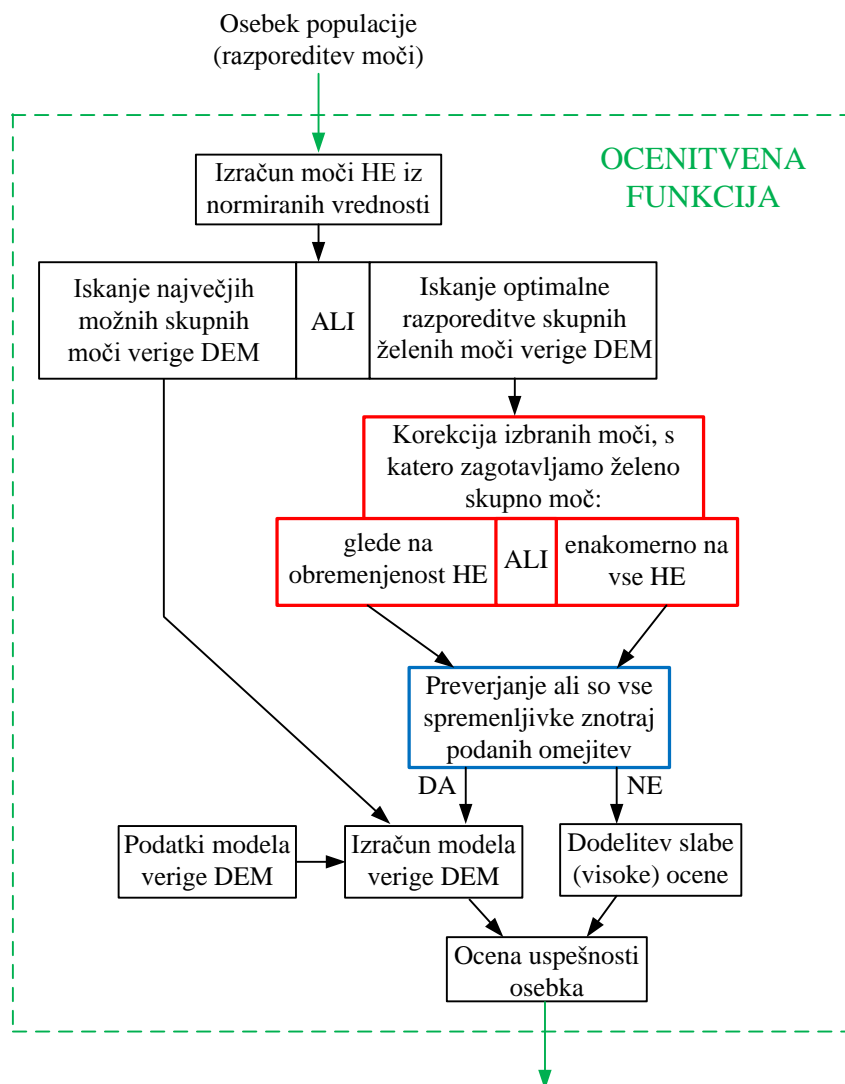
Za določitev ocene enega samega osebka populacije je potrebno izračunati vse potrebne parametre in pripraviti ustrezne podatke, ki omogočajo izračun modela verige DEM. Celotna ocenitvena funkcija je zato sestavljena iz večjega števila zaključenih enot, ki skupaj omogočajo izračun ocene uspešnosti osebka. Zaradi večje univerzalnosti optimizacije smo ocenitveni funkciji dodali nekatere dodatne možnosti, ki omogočajo tudi drugačno vrsto optimizacije. Z drugačno vrsto optimizacije namreč lahko iščemo obratovalne diagrame HE, ki imajo čim večjo skupno moč (skupne moči niso določene vnaprej). Pri tem je potrebno podati želene količine vode, ki naj bodo v bazenih po določenem časovnem obdobju. S takšnim načinom optimiranja poiščemo največje možne skupne moči HE, ki jih je možno doseči s prerazporeditvijo razpoložljive količine vode. Za dodatne možnosti optimiranja proizvodnje verige DEM smo se odločili, ker lahko z manjšo spremembo obstoječe ocenitvene funkcije dosežemo povsem drug način optimiranja. Ena izmed večjih sprememb, ki zelo prispeva k univerzalnosti optimizacije, je možnost optimiranja s krajšim časom konstantne moči. Eno uro konstantne želene moči verige DEM lahko dosežemo s spreminjanjem moči HE po koraku 30 ali 15 minut in ne samo s korakom ene ure. Seveda se na ta način bistveno poveča število spremenljivk, saj se lahko moč HE pri 15 minutnem koraku spremeni kar štiri krat (v času ene ure). Primer takšnega obratovalnega diagrama je prikazan v tabeli 5.1, kjer je na primeru dveh obratovalnih ur prikazano povečanje števila spremenljivk. Zaradi povečanja števila spremenljivk je na ta način smiselno optimirati zgolj krajša obratovalna obdobja. Namen omenjene dodatne možnosti je omogočiti primerjave rezultatov optimizacije v primeru uporabe različnih časovnih korakov konstantnih moči.

Tabela 5.1: Primer dela obratovalnega diagrama s 15 minutnim časovnim korakom

Moč DEM		Moč posamezne HE (MW)							
Ura	(MW)	DRAV	VUZ	VUH	OZB	FAL	MO	ZLAT	FOR
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
6:00	75	?	?	?	?	?	?	?	?
		?	?	?	?	?	?	?	?
		?	?	?	?	?	?	?	?
		?	?	?	?	?	?	?	?
7:00	242	?	?	?	?	?	?	?	?
		?	?	?	?	?	?	?	?
		?	?	?	?	?	?	?	?
		?	?	?	?	?	?	?	?
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	

Rdeči blok ocenitvene funkcije s slike 5.1 lahko predstavimo z novo blokovno shemo na kateri je prikazana podrobnejša sestava ocenitvene funkcije (slika 5.2). Vhod v ocenitveno funkcijo je en sam osebek populacije. Osebek je matrika normiranih moči HE, ki jih je določil GA na podlagi operatorjev selekcije, križanja in mutacije. Ocenitvena funkcija mora najprej na podlagi normiranih vrednosti izračunati prave vrednosti moči HE. Nadaljni potek izračuna je odvisen od načina izbire optimiranja proizvodnje, saj lahko izbiramo med dvema različnima možnostima, ki sta že bili opisani. V primeru iskanja optimalne razporeditve skupne želene moči verige DEM je potrebno izbrane moči GA predhodno ustrezno korigirati oziroma popraviti (slika 5.2, rdeči blok). Na voljo imamo dve različni metodi korekcije. Zakaj je potrebna korekcija izbranih moči in kakšni sta omenjeni metodi, bo zaradi pomembnosti in obsežnosti opisa več podanega v naslednjem podpoglavju. Korigirane vrednosti moči je potrebno preveriti ali se le-te nahajajo znotraj dovoljenih območij. Če se vse moči HE nahajajo znotraj dovoljenih območij, potem lahko takšen osebek populacije ocenimo z izračunom modela verige DEM. Na podlagi rezultatov izračuna modela verige DEM in ustreznih sankcij izračunamo oceno uspešnosti osebka, ki je hkrati tudi izhod ocenitvene funkcije. Če vse moči HE ne ležijo znotraj dovoljenih območij, se takšnega osebka populacije ne oceni z izračunom modela, ampak se mu neposredno dodeli slaba (visoka) ocena. Na ta način genetskemu algoritmu »sporočimo«,

da takšna razporeditev moči ni sprejemljiva in zato obstaja mala verjetnost, da bo ta osebek izbran kot starš naslednje generacije osebkov.



Slika 5.2: Blokovna shema ocenitvene funkcije

Izračun ocenitvene funkcije predstavlja časovno najbolj potraten del GA, še posebej zaradi izračuna modela verige DEM. Ocenitev osebkov celotne populacije lahko traja precej časa, saj je potrebno oceniti vsak osebek posebej. Obstajajo pa različni načini s katerimi lahko izračunamo uspešnosti osebkov populacije.

Osnovni način je zaporedni (angleško serial) način izračuna ocene uspešnosti osebkov populacije. Pri zaporednem načinu se za vsak osebek posebej izračuna ocenitvena funkcija in zato tudi model verige DEM. V primeru števila populacije na primer  $N = 1000$ ,

je potrebno za vsako generacijo osebkov model verige DEM izračunati 1000 krat. Takšen način izračuna je časovno zelo potraten in je smiseln zgolj pri optimiranju problemov, katerih ocenitveno funkcijo lahko izračunamo v le nekaj tisočinkah sekunde.

Drugi način izračuna ocene uspešnosti osebkov populacije je vzporedni način [5] (angleško parallel). Vzporedni način izračuna uporabimo, kadar imamo na voljo računalnik z večjedrnim procesorjem ali pa mrežo računalnikov z vsaj enojedrnim procesorjem, še boljše pa je z večjedrnimi procesorji. Osebki populacije GA so namreč med sabo povsem neodvisni, hkrati pa njihovo uspešnost ocenjujemo s povsem enako ocenitveno funkcijo. Zato izračunamo povsem enak model 1000 krat, v katerem se spremenijo le vrednosti moči, ki jih predstavlja en sam osebek. Neodvisnost osebkov populacije omogoča paralelni izračun njihovih uspešnosti. V primeru uporabe računalnika s štirijedrnim procesorjem lahko hkrati (paralelno) izračunamo uspešnost štirih osebkov. Tudi v tem primeru je potrebno izračunati model verige DEM 1000 krat, vendar se štirje modeli računajo hkrati. V primeru uporabe štirijedrnega procesorja lahko prihranimo do 75 % (idealno) časa v primerjavi s prvim (zaporednim) načinom. Zaradi uporabe vzporednega izračuna, se določen čas izračuna porabi za sam paralelni izračun, zato je v realnosti možno pričakovati nekoliko manjši prihranek časa (približno 70 %). Če uporabimo več kot štiri jedra, je lahko prihranek časa še večji, vendar prihranek ne narašča linearno s številom jeder. V primeru uporabe mreže računalnikov je prihranek časa nekoliko manjši, saj je komunikacija med računalniki precej počasnejša. Vzporedni način izračuna je smiselno uporabiti, če je optimizacijski problem zahtevnejši in traja izračun ene ocenitvene funkcije precej dolgo.

Tretji način izračuna ocene uspešnosti osebkov populacije je vektorski (ang. vectorized) način. Z vektorskim načinom se vsi osebki populacije ovrednotijo hkrati z le enim samim izračunom modela verige DEM. V tem načinu je potrebno vhodne podatke modela pripraviti povsem drugače, kot pa v prvih dveh načinih (zaporedni in vzporedni način). Model verige DEM je povsem enak kot v prvih dveh načinih, le moč posamezne HE ni več predstavljena kot en sam časovni potek moči, ampak kot celotno polje moči. Polje moči (za eno HE) je predstavljeno z matriko, v kateri vsak stolpec matrike predstavlja časovni potek moči enega osebka. Zaradi izračuna vseh osebkov populacije hkrati, traja izračun takšnega modela precej dlje časa, ampak je potreben le en sam izračun modela. Z vektorskim načinom izračuna lahko bistveno hitreje izračunamo ocene

uspešnosti celotne populacije osebkov. Optimizacija obratovanja verige DEM, ki je predstavljena v tem diplomskem delu, temelji na vektorskem načinu izračuna ocen uspešnosti osebkov populacije.

Uspešnosti osebkov populacije pa bi bilo možno izračunati še hitreje. Ideja je v združitvi vektorskega in paralelnega načina. Pri vektorskem načinu izračuna se namreč z izračunom enega samega modela oceni celotno populacijo. Zaradi tega lahko izračun modela opravi le eno samo jedro. Če imamo navoljo štirijedrni procesor so v tem primeru tri jedra neizkoriščena. Celotno populacijo osebkov lahko razdelimo na štiri dele in vsak del izračunamo hkrati (paralelno) z vektorskim načinom izračuna. V tem primeru so potrebni štirje izračuni modela verige DEM, ki pa se računajo istočasno. V primerjavi z vektorskim načinom se eden od štirih modelov izračuna precej hitreje, saj en model prevzame le četrtno osebkov celotne populacije. Izračun ocen uspešnosti osebkov populacije s paralelno-vektorskim načinom bi moral biti precej hitrejši v primerjavi z vektorskim načinom. Ampak tega ne moremo potrditi saj paralelno-vektorskega načina nismo preizkusili. Z opisom paralelno-vektorskega načina dajemo zgolj dodatno možnost za pohitritev optimizacije.

### **5.3 Korekcija moči HE**

V tem podpoglavju bo opisana vloga korekcije moči HE pri izračunu uspešnosti posameznega osebka. Korekcija moči je na blokovni shemi ocenitvene funkcije (slika 5.2) označena z rdečim blokom. Korekcija moči HE v času ene ure obratovanja je potrebna zaradi težav z osnovnim načinom optimizacije obratovanja verige DEM. Pri osnovnem načinu optimiranja se genetskemu algoritmu določi število spremenljivk in njihovih omejitev, ter linearne enakosti. S pomočjo linearnih enakosti optimizacijskega problema podamo medsebojno odvisnost spremenljivk, kar v našem primeru predstavlja vsote skupnih moči HE v času ene ure. Ker imamo podane skupne zelene moči verige DEM za vsako uro posebej, mora biti vsota vseh moči HE v vsaki uri obratovanja enaka zeleni skupni moči verige DEM. Ker pa GA z operatorjem mutacije naključno spreminja osebke populacije in s tem informacijo o močeh HE, bi se lahko zgodilo, da vsota moči HE v času ene ure ne bi bila več enaka skupni zeleni moči verige DEM. Na podlagi linearnih enakosti

GA vedno izbira spremenljivke (moči) tako, da je vsota izbranih moči, ki predstavljajo moči HE v času ene ure (za vsako uro posebej), vedno enaka skupni želeni moči verige DEM. Vendar se je ta osnovni način določanja moči HE izkazal kot nesprejemljiv. Razloga za nesprejemljivost osnovne metode sta predvsem dva. Prvi razlog je v času izračuna optimizacije. Če pri GA uporabimo med omejitvami spremenljivk tudi linearne enakosti, se pred pričetkom optimizacije pojavi zelo dolgotrajen preračun omejitev in linearnih enakosti, ki pri večjem številu osebkov postane nerazumljivo dolg. Število osebkov GA je v osnovi priporočeno (ni obvezno) kot desetkratna vrednost števila spremenljivk. V našem primeru lahko to pomeni slabih 2000 osebkov. Vendar se je izkazalo, da že pri izbranem številu osebkov  $N = 500$ , postane predpriprava optimizacije zelo dolga, saj traja več kot pol ure. Ker je bil zastavljeni cilj časa izračuna optimizacije največ 10 minut, je bil osnovni način optimizacije z linearnimi omejitvami povsem nesprejemljiv. Kaj natančno se dogaja v času predpriprave optimizacije nam ni znano, je pa to najverjetneje posledica naključnih števil, ki so ena izmed pomembnih elementov GA (mutacija). Zaradi naključnih števil in omejitve linearnih enakosti si mora GA pred optimizacijo pripraviti enačbe, ki bodo kljub naključnim številom zagotavljale pogoj linearnih enakosti. Drugi razlog zaradi katerega ni možno uporabiti osnovnega principa optimizacije je v uporabi normiranih vrednosti moči. Zaradi linearnih enakosti namreč ne moremo uporabiti normiranih vrednosti spremenljivk, s katerimi smo rešili težavo nedovoljenega območja moči HE, o kateri smo pisali v poglavju 4.3.

Ker se je osnovni način optimiranja izkazal kot neuporaben, je bilo potrebno spremeniti princip optimizacije tako, da pri GA nismo uporabili linearnih enakosti. To je povsem spremenilo princip optimizacije, saj smo morali znotraj ocenitvene funkcije sami zagotavljati, da je vsota moči v času ene ure enaka skupni želeni vrednosti moči. V tem primeru namreč GA naključno izbira spremenljivke (znotraj omejitev), katerih skupna vsota moči ni nikoli enaka skupni želeni vrednosti moči. Vsota naključno izbranih moči je vedno večja ali manjša od skupne želene moči. Zato se je postavljalo vprašanje, kako ta presežek ali primanjkljaj moči znotraj ene ure razporediti po udeleženi HE, da bo kljub temu vsota moči vseh udeleženi HE enaka skupni želeni moči. Težavo razporejanja presežka oziroma primanjkljaja moči smo rešili na dva različna načina, ki imata vsak svoje prednosti in slabosti, njun opis pa je podan v naslednjih dveh ločenih podpoglavjih.

### 5.3.1 Enakomerna razporeditev presežka oziroma primanjkljaja moči

Eden od načinov, kako kljub naključno izbranim močem zagotoviti enako vsoto moči kot je skupna zelena moč, je v enakomerni razporeditvi presežka oziroma primanjkljaja moči po vseh udeleženi HE. O udeleženi HE govorimo zato, ker ni nujno, da so to vse HE verige DEM. Pri enakomerni razporeditvi presežka oziroma primanjkljaja moči GA izbere za eno uro obratovanja 8 naključno izbranih moči znotraj podanih omejitev. V ocenitveni funkciji izračunamo vsoto naključnih izbranih moči in jo odštejemo od skupne zelene moči za to uro. V primeru večje vsote naključno izbranih moči v primerjavi z skupno zeleno vrednostjo, dobimo presežek skupne moči. Presežek moči delimo s številom udeleženi HE in dobimo eno osmino presežka moči, ki ga nato odštejemo od vsake naključno izbrane moči (v primeru primanjkljaja moči pa prištejemo). Nove korigirane naključne moči imajo sedaj skupno vsoto moči, ki je enaka skupni zeleni moči. Vendar se lahko pojavi težava, saj so bile naključno izbrane moči s strani GA znotraj dovoljenih meja, za korigirane naključne moči pa tega ne moremo trditi. Po korigiranju moči sledi še preizkušanje ali ležijo vse korigirane moči znotraj dovoljenih omejitev (slika 5.2, modri blok). V tem primeru so kot dovoljene meje mišljene skrajne omejitve moči HE in ne tiste, ki so določene v GA. V GA so namreč uporabljene ožje omejitve, ki smo jih dobili na podlagi analize urnih povprečij (poglavje 4.2). Če moči ležijo znotraj dovoljenih mej, potem je takšen osebek GA ustrezen in ga lahko ocenimo z ocenitveno funkcijo, sicer mu neposredno dodelimo slab rezultat ocenitvene funkcije in ga niti ne preizkusimo (ne izračunamo modela verige DEM). Takšen način razporejanja moči ima to prednost, da se zaradi enakomernega razporejanja presežka oziroma primanjkljaja moči ohranja razmerje moči med HE znotraj ene opazovane ure. Pomanjkljivost pa je v možni prekoračitvi omejitve moči HE in posledično zavrnitve takšnega osebka GA.

### 5.3.2 Razporeditev presežka oz. primanjkljaja moči glede na obremenitev HE

Drugi način razporeditve presežka oziroma primanjkljaja moči je glede na obremenitev posamezne HE. V tem primeru GA izbere za eno uro obratovanja 8 naključno izbranih moči znotraj dovoljenih mej. V ocenitveni funkciji izračunamo vsoto naključnih izbranih moči in jo odštejemo od skupne zelene moči za to uro. Iz naključno izbranih moči in podanih skrajnih omejitev moči HE izračunamo koliko moči je bilo posamezni HE že



dodeljenih in koliko moči lahko posamezna HE še zagotovi. V tem primeru se minimalna moč HE ne upošteva, upošteva se samo moč, ki je večja od minimalne moči HE. V primeru presežka naključnih moči, se ta presežek odšteje od naključno izbranih moči glede na to, koliko moči je bilo posamezni HE že dodeljene. V primeru primanjkljaja moči pa se primanjkljaj moči porazdeli po HE glede na to, s kolikšno močjo lahko posamezno HE še obremenimo. Takšen način razporejanja moči omogoča manjše število neustreznih osebkov, saj se skoraj ne more zgoditi, da bi korigirane naključne vrednosti moči bile izven dovoljenega območja. Ima pa to slabost, da so korigirane moči preveč enakomerno razporejene po HE. Enakomerna razporejenost namreč onemogoča iskanje optimalne rešitve po celotnem območju iskanja. Slaba raspršenost osebkov GA namreč lahko vodi v lokalni optimum.

## 6. PREIZKUŠANJE OPTIMIZACIJE

V tem poglavju bodo predstavljeni rezultati optimizacije obratovanja verige DEM, pri kateri iščemo optimalno porazdelitev skupnih zelenih moči. Pri optimizaciji je bila uporabljena kriterijska funkcija, pri kateri želimo zagotoviti določeno stanje nivojev vode v bazenih po določenem času obratovanja. Izbrali smo zeleni relativni nivo vode 0.5 m za vseh osem bazenov. Predvideni čas obratovanja je bil 18 ur. Pred optimizacijo so bili določeni vsi potrebni podatki, ki so predstavljeni v tabelah od 6.1 do 6.3. Čas izračuna optimizacije je bil omejen na deset minut.

Tabela 6.1: Začetni pogoji optimizacije

	HE							
	DRAV	VUZ	VUH	OZB	FAL	MO	ZLAT	FOR
Lokalni pritoki (m <sup>3</sup> /s)	5	5	5	5	5	5	0	0
Začetni nivoji bazenov (m)	0.77	0.44	0.44	0.63	0.80	0.15	0.99	0.75
Želeni nivoji bazenov (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Pretoki preliv. polj (m <sup>3</sup> /s)	0	0	0	0	0	0	10	10
Število razpoložljivih agr.	3	3	3	3	3	3	2	2
Število ur obratovanja	18							
Čas. kon. integracije (min)	5							
Število populacije	1000							
Korak konst. moči (min)	60							

Tabela 6.2: Tabela predvidenih pretokov avstrijske HE Labot

Ura	Pretoki HE Labot											
	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
Pretok (m <sup>3</sup> /s)	0	0	0	0	0	0	75	242	453	372	478	499
Ura	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Pretok (m <sup>3</sup> /s)	448	240	326	336	322	293	336	473	509	229	58	6

Tabela 6.3: Tabela skupnih zelenih moči

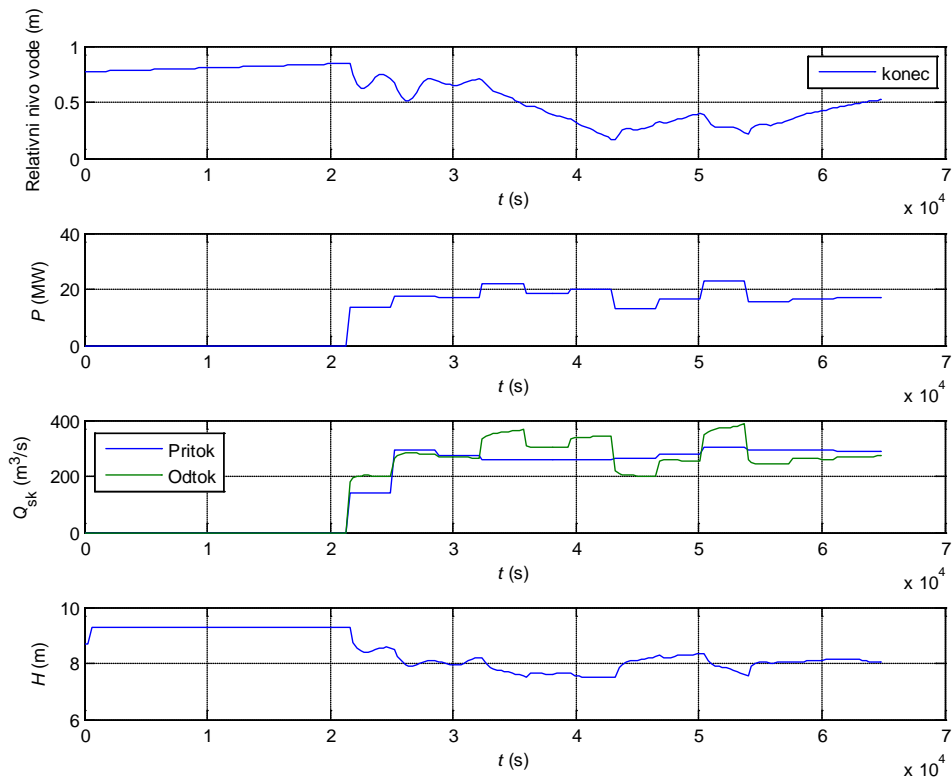
		Želene moči verige DEM											
Ura	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	
Moč (MW)	0	0	0	0	0	0	75	242	453	372	478	499	
Ura	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
Moč (MW)	448	240	326	336	322	293	336	473	509	229	58	6	

V tabeli 6.4 so podani rezultati optimizacije. Rezultati optimizacije so obratovalni diagrami posameznih HE. Na slikah od 6.1 do 6.8 so prikazani časovni poteki nivojev vode na začetku in na koncu bazenov, moči, pritokov in odtokov, ter padcev vode.

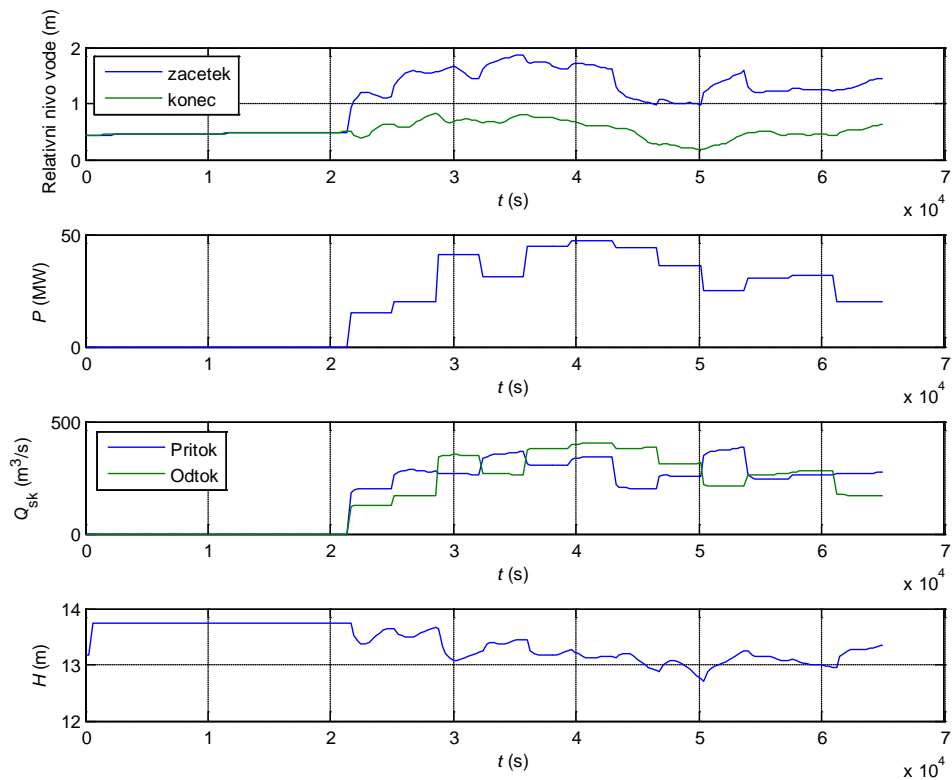
Pri časovnih potekih nivojev vode v bazenih je potrebno upoštevati, da so kot zelene vrednosti nivojev vode v bazenih mišljeni nivoji vode v stacionarnem stanju. Zato se pri optimizaciji računajo odstopanja od zelenih vrednosti nivojev na podlagi koristne prostornine vode v bazenu. Po končanem obratovalnem obdobju se iz trenutnih vrednosti koristnih prostornin vode v bazenih izračunajo nivoji vode v stacionarnem stanju. Zaradi tega je iz časovnih potekov nivojev vode težko sklepati ali so bili izpolnjeni pogoji o zelenih nivojih vode v bazenih.

Tabela 6.4: Rezultati optimizacije

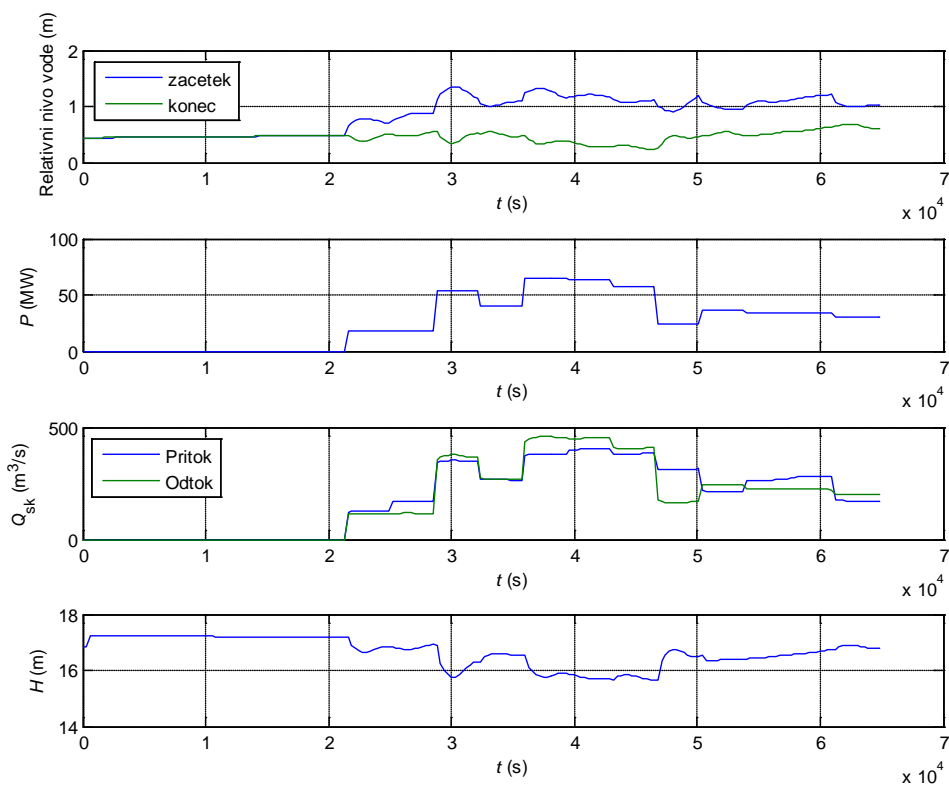
		Moči posameznih HE (MW)							
Ura	DRAV	VUZ	VUH	OZB	FAL	MO	ZLAT	FOR	
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:00	13,5	15,0	17,4	15,9	13,2	0	0	0	
7:00	17,8	19,9	17,8	22,6	29,0	29,7	60,2	45,1	
8:00	17,0	41,1	53,9	66,8	47,2	40,4	101,2	85,3	
9:00	21,7	31,0	40,0	46,7	35,6	36,4	87,0	73,7	
10:00	18,4	44,8	64,7	63,3	44,6	44,5	99,2	98,5	
11:00	20,1	46,9	63,5	62,8	48,2	48,1	113,5	95,8	
12:00	13,0	44,4	57,8	54,7	45,3	46,1	108,1	78,8	
13:00	16,7	36,0	24,4	22,9	17,4	23,8	51,7	47,2	
14:00	23,0	24,8	36,1	42,0	29,0	34,7	73,5	63,0	
15:00	15,5	30,4	33,8	40,0	23,6	29,1	69,8	93,9	
16:00	16,7	31,9	33,5	40,6	34,6	22,8	59,3	82,6	
17:00	17,2	19,9	30,1	29,8	35,0	22,5	63,2	75,4	



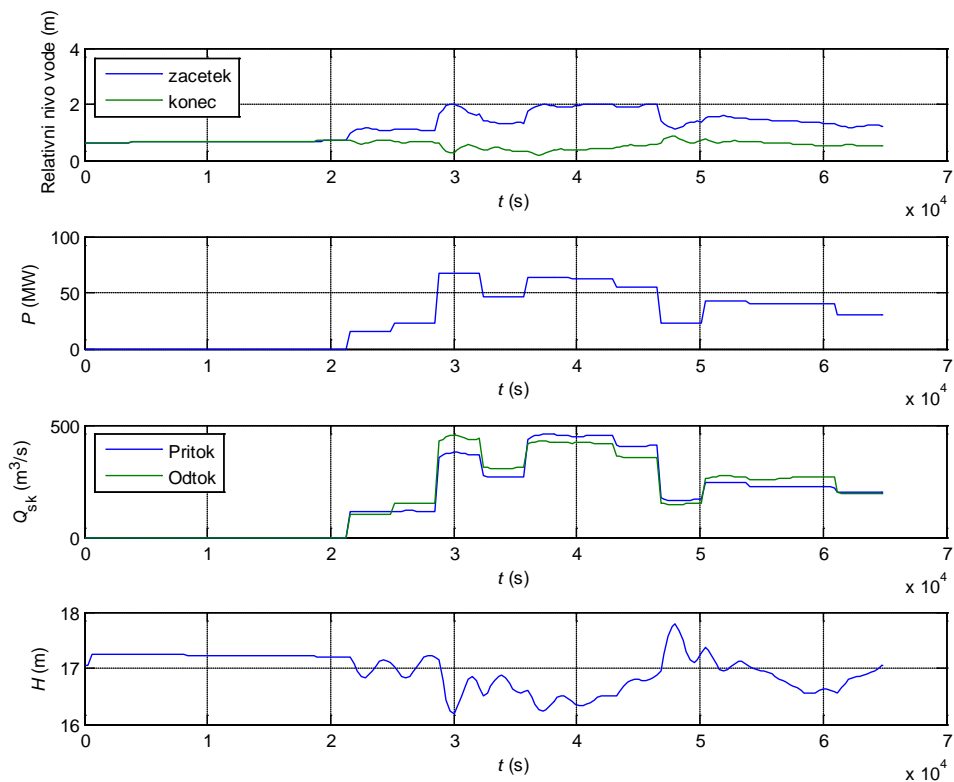
Slika 6.1: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Dravograd



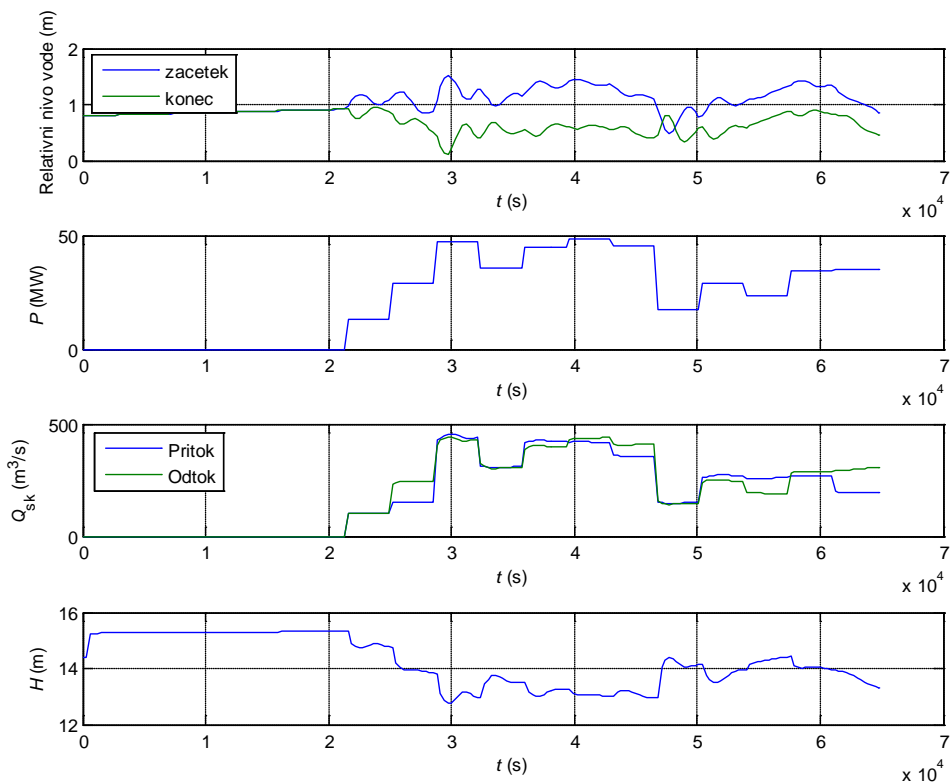
Slika 6.2: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Vuzenica



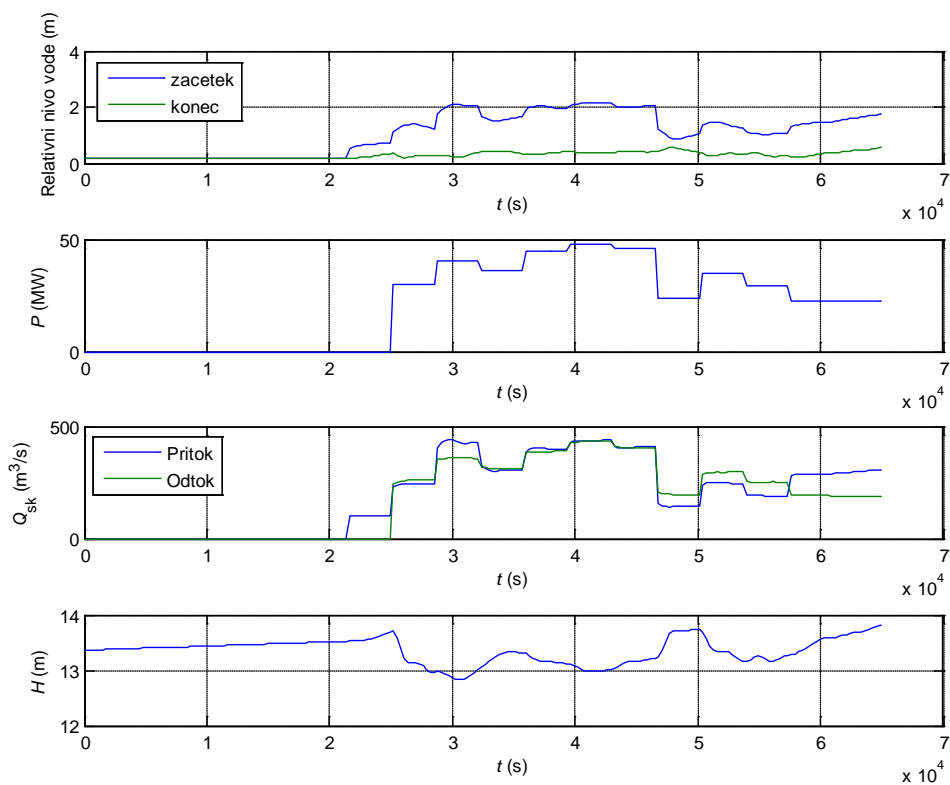
Slika 6.3: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Vuhred



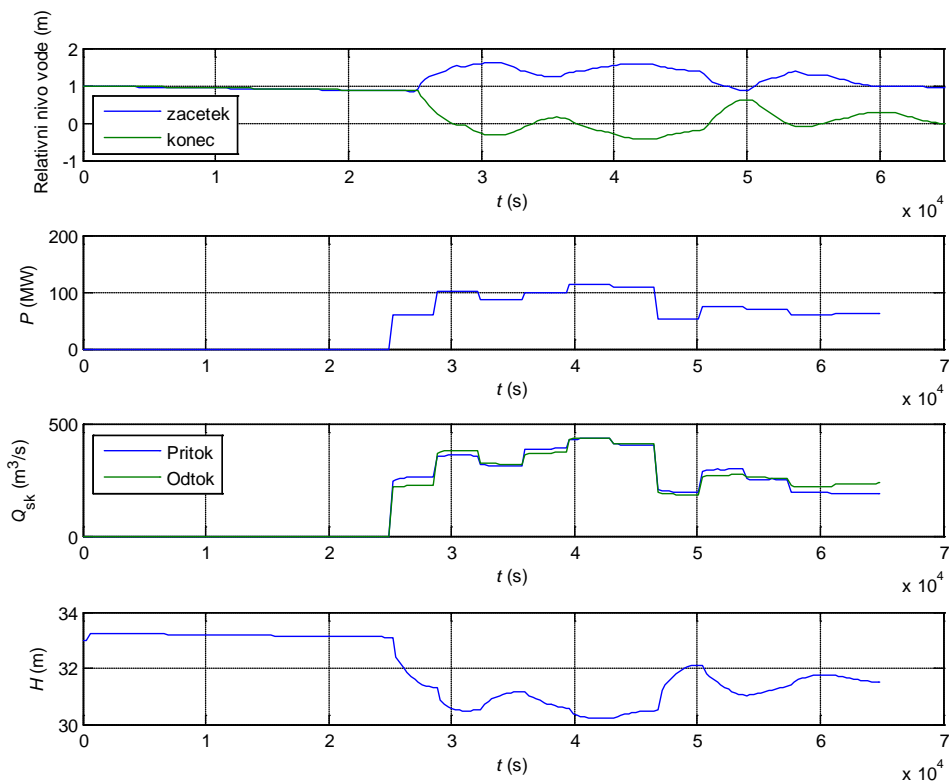
Slika 6.4: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Ožbalt



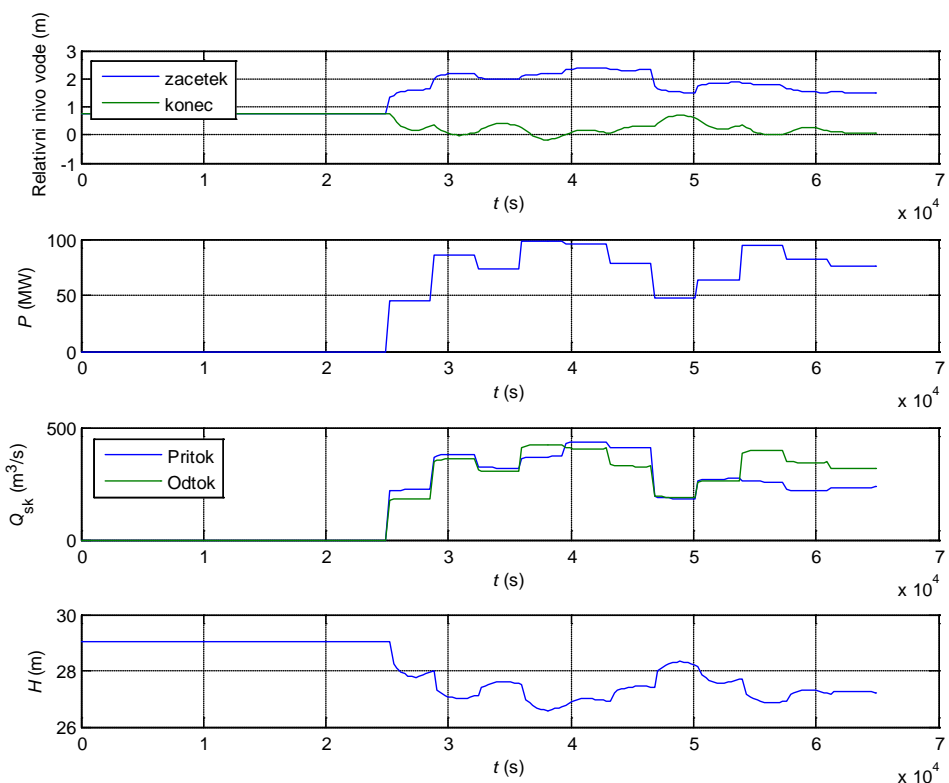
Slika 6.5: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Fala



Slika 6.6: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Mariborski otok



Slika 6.7: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Zlatoličje



Slika 6.8: Časovni poteki spremenljivk HE in bazena HE Formin

Iz časovnih potekov spremenljivk (slike 6.1 do 6.8) lahko razberemo, da je pri vseh bazenih nivo vode na koncu bazena znotraj dovoljenih meja (enega metra). Izjema sta le bazena HE Zlatoličje in Formin, pri katerih je zaradi kanala dovoljena denivelacija 1.7 metra. Zaradi tega se lahko nivo vode na koncu kanala zniža tudi pod relativno vrednost nič metra. Iz slike 6.7 in 6.8 lahko razberemo, da je pri HE Zlatoličje in Formin nivo vode na koncu kanala prav tako v dovoljenih mejah. Iz časovnih potekov pretokov HE lahko razberemo, da so vsi pretoki v dovoljenih mejah, saj so skupne vrednosti pretokov manjše od nazivnih vrednosti. Pri večini HE je nazivni pretok  $Q_{sk} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$ , razen pri HE Dravograd je  $Q_{sk} = 420 \text{ m}^3/\text{s}$ . Časovni poteki moči so bili določeni z optimizacijo, zaradi tega so vrednosti moči zagotovo znotraj dovoljenih meja. Iz opisanih ugotovitev lahko sklepamo, da je pri podanih začetnih pogojih možno zagotoviti želeni skupni obratovalni diagram moči verige DEM. Prav tako so bili vsaj približno doseženi želeni nivoji vode na koncu bazenov. Zaradi vnaprej podanega skupnega obratovalnega diagrama verige DEM je skoraj nemogoče pričakovati, da bi bili nivoji vode na koncu bazenov (po končanem obratovanju) povsem enaki želenim vrednostim. Pri predstavljenem primeru optimizacije je bil dovoljeni čas izračuna optimizacije omejen na deset minut. Kljub velikemu številu spremenljivk in potencialnih možnih rešitev optimizacije je možno v zastavljenem časovnem okvirju poiskati dovolj dober rezultat optimizacije. V okviru diplomskega dela pa smo podali kar nekaj možnih sprememb, ki bi omogočale še hitrejši izračun optimizacije in boljše rezultate.



## 7. SKLEP

V okviru diplomskega dela smo sestavili celotni model verige DEM. Model je sestavljen iz dinamičnih modelov bazenov in nelinearnih enoagregatnih modelov hidroelektrarn. Pripravili smo vse potrebne podatke za izračun modela verige DEM in optimizacije. Pri pripravi vhodnih podatkov optimizacije smo zmanjšali število spremenljivk optimizacije z uvedbo določenih pogojev obratovanja HE. Zaradi ekstremno velikega števila možnih rešitev optimizacije, smo naredili analizo izmerjenih urnih povprečij moči iz obdobja enega leta. Z analizo meritev smo zmanjšali problemsko področje optimizacije in s tem skrajšali čas optimizacije, prav tako pa povečali verjetnost, da z optimizacijo dosežemo globalni optimum. Z uvedbo vektorskega načina izračuna uspešnosti osebkov populacije smo bistveno skrajšali potreben čas optimizacije. Z uvedbo nekaterih dodatnih možnosti optimiranja smo naredili optimizacijo bolj univerzalno.

Pri preizkušanju modela verige DEM smo imeli vrsto težav zaradi nestabilnosti samega problema (bazeni predstavljajo integratorje) in ne povsem verodostojnih meritev. Na podlagi ustrežnejših izmerjenih vrednosti pretokov in nivojev vode v bazenih bi se lahko model verige DEM še izboljšalo. Optimizacijo in model verige DEM bi bilo potrebno še dopolniti z drugimi omejitvami, ki se pojavljajo pri obratovanju verige HE, vendar jih zaradi obsežnosti nismo upoštevali. Zraven omejitve nivojev vode v bazenih in omejitve pretokov HE, bi bilo potrebno upoštevati tudi omejitve hitrosti praznjenja bazenov in časovne omejitve obratovanja agregatov. Bazene HE namreč ni dovoljeno prazniti prehitro, saj se nivo vode na koncu bazena na sme spreminjati hitreje od 20 cm/h. Agregati HE imajo časovno omejitev, ki določa po kolikšnem času od zaustavitve smemo agregat ponovno zagnati. Omenjeni omejitvi nista postavljeni tako zelo strogo, kot pa je omejitev dovoljenih nivojev vode.

Iz rezultatov optimizacije lahko sklepamo o dobrem delovanju optimizacije obratovanja verige DEM. V zastavljenem časovnem okvirju desetih minut sicer lahko

dosežemo dovolj dobro rešitev optimizacije, vendar ne moremo trditi, da smo dosegli globalni optimum. Zaradi različnih vplivov na obratovanje verige DEM, kot so sekundarna regulacija, spreminjanje dotokov vode, različni filtri in tako naprej, preprečujejo obratovanje verige HE po vnaprej zastavljenih obratovalnih diagramih. Zaradi tega niti ni smiselno iskanje globalnega optimuma, ampak se zadovoljimo z dovolj dobro rešitvijo. Optimizacijo pa je seveda možno še izboljšati in pohitriti njen izračun. Eden od pomembnih predlogov je uporaba paralelno-vektorskega načina izračuna uspešnosti populacije, s katerim lahko izkoristimo večjedrne procesorje in tako bistveno povečamo hitrost izračuna optimizacije. S pravilno izbiro začetne populacije GA se lahko približamo globalnemu optimumu optimizacije in hkrati zagotovimo, da pričnemo izračun optimizacije z vsaj enim osebkom populacije, ki ne bo sankcioniran (prekoračitev dovoljenega nivoja vode v bazenu). Iskanje omenjenega osebka populacije je zelo pomembna in zahtevna naloga, zato se s tem nismo posebej ukvarjali.

## 8. VIRI, LITERATURA

- [1] R. Brezovnik, D. Dolinar: *Določitev enoagregatnega modela hidroelektrarne*, Maribor, 2008.
- [2] R. Brezovnik, D. Dolinar: *Analiza odstopanja pretokov med večagregatnim in enoagregatnim modelom elektrarne*, Maribor, 2008.
- [3] J. Zorko, G. Štumberger, J. Pihler: *Poenostavljen dinamični model pretakanja vode v odprtem kanalu, podan na osnovi analogije z električnim vezjem*, Maribor, 2005
- [4] The MathWorks<sup>TM</sup>: *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox<sup>TM</sup> 2, User's Guide*, 2008
- [5] The MathWorks<sup>TM</sup>: *Parallel Computing Toolbox<sup>TM</sup> 4, User's Guide*, 2008
- [6] Turboinštitut d.d.: *Aproksimacije pretokov agregatov dravskih elektrarn Maribor*, 1999