

Upravljanje otvorenim hidrauličkim sustavima

Sadko Mandžuka, Aco Šikanić, Dario Seferović
Brodarski institut, d.o.o.

Av.V.Holjevca 20, 10000 Zagreb, Hrvatska
sadko@hrbi.hr, asikanic@hrbi.hr, dario@hrbi.hr

OPEN-CHANNELS CONTROL

Abstract: Water flow control is the key concept in all aspects of water management. Water flow may be either uncontrolled (natural flow) or controlled. Mathematical simulations of water flow is based on mathematical models, by which water flow control algorithm can be verified before being applied on the real system. A method to design open-channel control system is described in this paper. A lot of well-known algorithms are described. Some advances in PLC-based open-channels control are listed.

1 Uvod

Suvremene potrebe za upravljanjem i vođenjem u vodnom gospodarstvu postaju sve značajnije, gdje su mogući korisnici elektroprivreda, vodno gospodarstvo, poljoprivreda, transportni sustavi, rekreacijski sustavi i dr. [1]. Sveobuhvatni pristup upravljanja vodnim resursima danas se označava kao menadžment vodama. Pri tome se koriste različite metode regulacije, upravljanja i vođenja ovakvih složenih sustava. U počecima razvoja primjenjivale su se metode odvojenih ciljnih funkcija. U današnje vrijeme, vodno-gospodarski sustavi postaju sve složeniji i pojedine namjene više se ne mogu analizirati odvojeno. Razvija se višenamjensko korištenje vodno-gospodarskih objekata, a poglavito akumulacija i transportnih kanala [2]. Na slici 1 prikazana je integralna slika korištenja vodnih sustava.

Pripadni sustavi upravljanja postaju sve složeniji, kako u sklopovskom smislu tako i kroz algoritimizaciju upravljanja, vođenja i

optimizacija. Osnovna značajka sustava upravljanja koja bitno određuje i pripadna

INTEGRALNI RAZVOJ, PRIMJENA I ZAŠTITA	DRUŠTVENI CILJEVI
	EKONOMSKI CILJEVI
	EKOLOŠKI CILJEVI
	KULTUROLOŠKI CILJEVI
	TRANSPORTNI CILJEVI
	URBANI CILJEVI
	VODNO-PRIČUVNI CILJEVI
	ENERGETSKI CILJEVI
	OBRAMBENI CILJEVI

Slika 1 Integralni pristup vodnom gospodarstvu

je inherentna prostorna distribuiranost mjerenja (razine, protoci i dr.) i izvršnih elemenata (razni hidrotehnički objekti – zatvarači, propusti, preljevi i dr.). Ta prostorna distribuiranost utječe i na moguća sklopovska rješenja. Danas se najčešće primjenjuju sustavi bazirani na PLC (Programmable Logic Controllers) te mrežna WAN struktura primjenom mikrovalnih prijamnika/odašiljača, ili danas u mnogim slučajevima povoljnija varijanta GSM tehnologije. Pri tome, može se pokazati da je GSM tehnologija ekonomski puno prihvatljivija varijanta. U prvom dijelu rada se daje prikaz fenomenologije samog procesa (matematičko modeli), drugi dio opisuje primjenu linearnih matričnih nejednadžbi za simultanu stabilizaciju, a u trećem dijelu moguće realizacije sustava upravljanja.

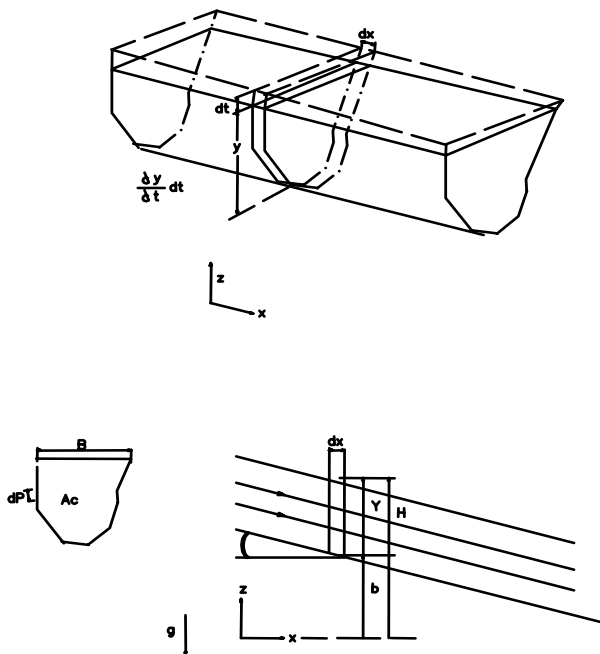
2 Matematički model

Dinamika procesa tečenja u kanalima i drugim otvorenim vodotocima je opisana dobro poznatim St. Venant nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama (Jean-Claude

Barre De Saint Venant, 1871) zasnovanim na dinamičkim zakonima Newtona, [3, 4]. Kako se radi o veoma složenoj hidrodinamskoj pojavi, a zbog pojednostavljenja modela, načinjene su slijedeće pretpostavke:

- geometrijska promjena profila kanala, svedena u vremensko mjerilo, je zanemariva u odnosu na promjene dubine i brzine strujanja,
- strujnice u vodotoku su paralelne,
- gustoća vode po profilu i duljini kanala je jednolika,
- stišljivost vode je zanemariva, (kako se radi i tečenju sa otvorenim licem to je uvijek zadovoljeno),
- nagib kanala (I) je dovoljno mala, tako da vrijede aproksimacije $\sin(I) \cong I$, $\cos(I) \cong 1$

St. Venant model gibanja je zasnovan na zakonu sačuvanja mase i momenta kontrolnog volumena, kako je to prikazana na slici 2.



Slika 2: Osnovna geometrija kanala

Zakon sačuvanja mase može se prikazati u obliku:

$$B \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

gdje je:

B – širina kanala (m),

Y – dubina tečenja (m),

t – vrijeme (s),

Q – brzina tečenja (m³/s),

x – nizvodna udaljenost (m),

q_l – lateralni dotok po jedinici duljine (m²/s).

Zakon sačuvanja momenta za kontrolni volumen je:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -2\beta \frac{Q}{A_c} \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta \frac{Q^2}{A_c^2} \frac{\partial A_c}{\partial x} - \frac{|Q|Qgn^2}{A_c R^{4/3}} + g(I - \frac{\partial Y}{\partial x})A_c \quad (2)$$

gdje je:

A_c – omočeni presjek (m²),

β - korektivni koeficijent (-),

g – gravitacijsko ubrzanje (m/s²),

I – nagib kanala (rad),

n – Manningov koeficijent otpora tečenja (s/m^{1/3}),

R - hidraulički radijus (m).

Klasični problem pri projektiranju sustava upravljanja je rješavanje kompromisa pri izboru složenosti odgovarajućeg matematičkog modela. Naime, iz perspektive točnosti ponašanja matematičkog modela, ukazuje se potreba za što većom složenosti modela, kako bi isti uključivao što veći broj informacija i međuovisnosti. S druge strane, primjena odgovarajućih algoritama i metoda projektiranja ukazuju na potrebu jednostavnijih matematičkih modela. Pri tome bitan je princip: *Nije potrebno izrađivati složene modele ako i jednostavniji mogu poslužiti.* Važno je unaprijed definirati područje primjene matematičkog modela, jer za različite primjene koriste se matematički modeli različite strukture, složenosti i drugo. Kod projektiranja upravljačkih algoritama koristi se slijedeća procedura:

1. Izradi se dovoljno točan matematički model za potrebe sinteze algoritama upravljanja

- (složenost ovisi i o korištenoj metodologiji projektiranja upravljanja),
2. Kod projektiranja koristi se neka od metoda robusnog upravljanja, kako bi se potisnuli utjecaji greške modeliranja (parametarska greška modeliranja, nemodelirana dinamika),
 3. Za potrebe verifikacije dobivenih algoritama upravljanja koriste se modeli veće složenosti (uključivanje viših dinamika, nelinearni efekti i dr.).
 4. Primjenom postoptimalne analize (teorija osjetljivosti) ispitati utjecaj promjene pojedinih parametara na značajke upravljačkog algoritma.

Za potrebe projektiranja sustava upravljanja nelinearni matematički model opisan jednadžbama (1-2) linearizira se za određenu radnu točku i može se prikazati u obliku:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} + B_0 \frac{\partial h}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} + 2V_0 \frac{\partial q}{\partial x} + (c_0^2 - V_0^2) B_0 \frac{\partial h}{\partial x} - \beta_0 q - \gamma_0 h &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

gdje je:

$h = H - H_0$ (varijacija dubine),

$q = Q - Q_0$ (varijacija protoka),

$V_0 = Q_0/A_{c0}$ (srednja brzina),

$c = \sqrt{\frac{gA_{c0}}{B_0}}$ (brzina vala),

β_0, γ_0 – konstante (vidi dodatak u [3]).

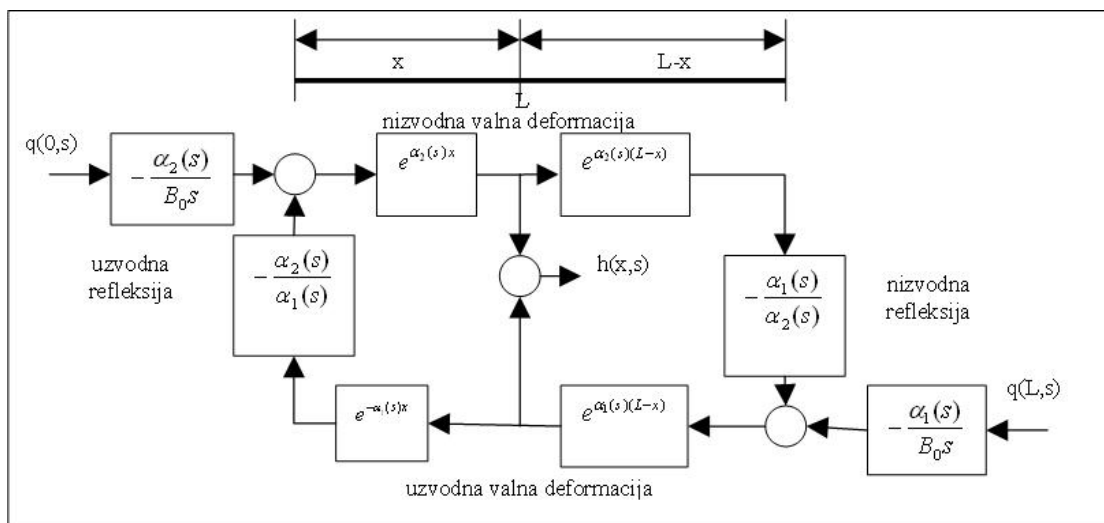
Primjenom transformacije Laplace-a, za pojedinu sekciju kanala, pripadni linearni matematički model prikazan je na slici 3. Ulazne veličine su ulazni i izlazni protok, a izlazna veličina je razina na poziciji x nizvodno.

Na slici 3. oznake $\alpha_1(s)$ i $\alpha_2(s)$ su su svojstvene vrijednosti linearnog sustava (3). Gornji sustav opisuje dinamiku razine u kanalu na poziciji x . Osim ovog pristupa moguće je dobiti i odgovarajući matematički model u prostoru stanja. Ovaj postupak se zasniva na metodi konačnih diferencija (npr. pravila centralne diferencije). Matematički model (3) u tom slučaju, za N čvorova, može se prikazati u obliku:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_i}{\partial t} &= \frac{1}{B_0} \frac{q_{i+1} - q_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \\ \frac{\partial q_i}{\partial t} &= -2V_0 \frac{q_{i+1} - q_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} - (c_0^2 - V_0^2) B_0 \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} + \beta_0 q_i + \gamma_0 h_i \end{aligned} \quad (4)$$

Protoci u čvorovima 1 i N su ulazi u sustav, a pripadne razine u tim čvorovima (ne može se primijeniti metoda centralnih diferencija) jednostavno se računaju kao:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_1}{\partial t} &= \frac{1}{B_{01}} \frac{q_2 - q_1}{x_2 - x_1} \\ \frac{\partial h_N}{\partial t} &= \frac{1}{B_{0N}} \frac{q_{N-1} - q_N}{x_{N-1} - x_N} \end{aligned} \quad (5)$$



Slika 3 Matematičko model gibanja vala u kanalu

Na ovaj način je pripravljen matematički model za realizaciju sustava upravljanja. Pri tome, važno je napomenuti, da se ulaznim varijablama (ulazni i izlazni protok) upravlja preko hidrotehničkih uređaja tipa zatvarača i dr.

3 Primjena LMI kod simultane stabilizacije

Za potrebe projektiranja regulatora za više radnih točaka mogu se primijeniti različiti algoritmi robusifikacije. U ovom radu se primjenjuje postupak simultane stabilizacije zasnovan na primjeni linearnih matričnih nejednadžbi. Neka je dinamički vremensko-promjenljivi linearni sustav opisan u obliku:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad x(0) = x_0 \quad (6)$$

Prostor vrijednosti matrica A i B obrazuje konveksni politopski skup Ω definiran preko skupa svojih vrhova u obliku:

$$\Omega = \{A(t), B(t)\} \in \{[A_1 B_1], \dots, [A_l B_l]\} \quad (7)$$

Treba osigurati jedinstveni regulator u obliku matrice pojačanja stanja K, kao $u = Kx$, tako da je:

$$\dot{x}(t) = [A(t) + B(t)K]x(t) \quad x(0) = x_0 \quad (8)$$

Neka je indeks performansi zadan u standardnom obliku:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (9)$$

$$Q > 0 \quad R > 0$$

Označimo najlošiju vrijednost gornjeg indeksa performansi:

$$J_{wc} = \max \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt =$$

$$\max \int_0^{\infty} [x^T(t)(Q + K^T RK)x(t)]dt \quad (10)$$

gdje je maksimalizacije uzeta za sve moguće trajektorije. Zadaća je naći takvu matricu regulator stanja K i kvadratičnu Ljapunovljevu matricu P koji minimiziraju granicu performansi

$x_0^T P x_0$ po indeksu performansi J_{wc} . Treba primijetiti da ovaj pristup simultano stabilizira sustav i garantira granicu performansi.

Navedeni problem optimizacije može se prikazati u matričnom obliku:

$$\min_{K,P} x_0^T P x_0$$

$$(A_i + B_i K)^T P + P(A_i + B_i K) + Q + K^T R K \leq 0 \quad i=1..S \quad (11)$$

$$P > 0$$

Uvođenjem supstitucija:

$$Y = P^{-1} \quad W = KP^{-1}$$

$$P > 0 \quad Y > 0 \quad (12)$$

$$P = Y^{-1} \quad K = WY^{-1}$$

nejednadžbe možemo pisati u obliku:

$$(A_i + B_i W Y^{-1})^T Y^{-1} + Y^{-1}(A_i + B_i W Y^{-1}) + Q + K^T R K \leq 0$$

$$i=1..S \quad (13)$$

Množenjem lijeve i desne strane sa Y dobiva se:

$$Y A_i^T + W^T B_i^T + A_i Y + B_i W + Y Q Y + W^T R W \leq 0 \quad (14)$$

odnosno grupiranjem pojedinih elemenata u obliku:

$$Y A_i^T + W^T B_i^T + A_i Y + B_i W + \begin{bmatrix} Y & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ W \end{bmatrix} \leq 0 \quad (15)$$

Korištenjem Schurova komplementa moguće je gornju kvadratičnu formu prikazati u obliku:

$$L_i(Y, W) = \begin{bmatrix} -Y A_i^T - W^T B_i^T - A_i Y - B_i W & Y & W^T \\ Y & Q^{-1} & 0 \\ W & 0 & R^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (16)$$

Na ovaj način smo originalnu nekonveksnu zadaću u P i K transformirali u linearnu matričnu nejednadžbu.

Vrijednost indeksa performansi, također, se može transformirati u linearnu matričnu nejednadžbu korištenjem pomoćne varijable γ .

$$\begin{aligned}
 x_0^T P x_0 &= x_0^T Y^{-1} x_0 \leq \gamma \\
 \begin{bmatrix} \gamma & x_0^T \\ x_0 & Y \end{bmatrix} &\geq 0
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Konačno zadaća optimizacije može se prikazati u integralnom obliku:

$$\begin{aligned}
 \min_{\gamma, Z} \quad & \gamma \\
 L_i(Y, W) &\geq 0 \quad i = 1, \dots, S \\
 \begin{bmatrix} \gamma & x_0^T \\ x_0 & Y \end{bmatrix} &\geq 0
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

što je standardna zadaća.

4 Optimizacija hidrauličkog sustava

U dosadašnjoj praktičnoj primjeni upravljanja i vođenja u otvorenim kanalima postoji nekoliko pristupa. Sa stanovišta upravljanja (razina osnovnog procesa), osnovu čini izbor pozicije upravljačke i izlazne varijable. Postoje tri osnovna modela:

1. upravljanje uzvodnom razinom sa nizvodnim zatvaračem,
2. upravljanje nizvodnom razinom sa uzvodnim zatvaračem,
3. kombinacija gornjih modela.

Kod upravljanja sustavima navodnjavanja uobičajeno se primjenjuje prvi model, a za transportne (navigacijske) kanale primjenjuje se drugi model. U oba slučaja mogu se primijeniti postupci unaprijednog (feedforward) upravljanja.

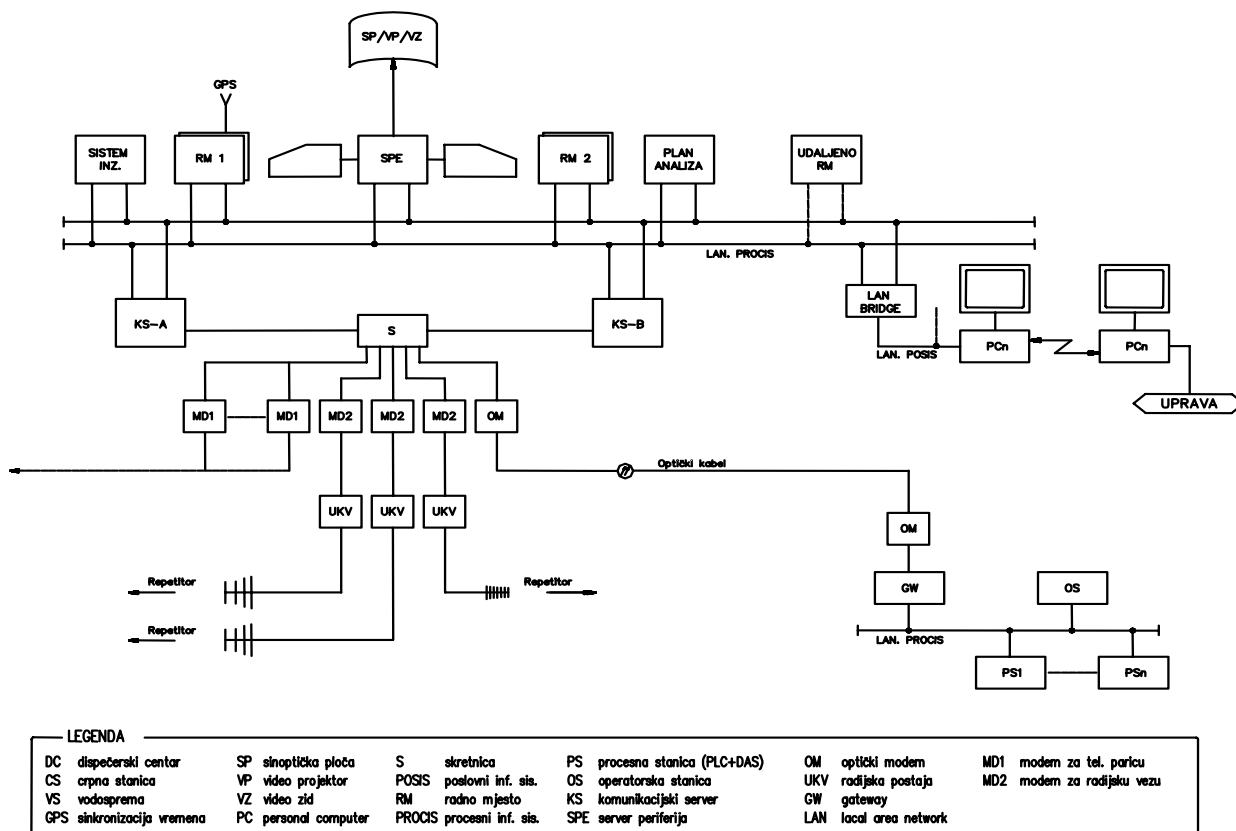
Za optimizaciju rada hidrotehničkih sustava (razina vođenja) razvijeno je niz metoda i tehnika, od kojih se najčešće, s više ili manje uspjeha, primjenjuju tehnike: linearnog programiranja, dinamičkog programiranja, nelinearnog programiranja, samostalno ili u međusobnim kombinacijama, [2]. U praktičnoj

primjeni optimalizacijskih tehnika, osim problema visoke dimenzionalnosti, pojavljuju se teškoće u povezivanju i zajedničkom radu optimalizacijskih i simulacijskih modela. Pri zajedničkom radu simulacijski se model koristi za kvantifikaciju izlaznih varijabli vodnogospodarskog sustava, koje optimalizacijski model preuzima za proračun vrijednosti ciljne funkcije [2].

Na slici 4 je prikazana jedna moguća realizacija upravljačko-informacijskog sustava složenog hidrotehničkog sustava. Posebnost ovakvih sustava je postojanje optimizatora na razini cjelokupnog sustava. Ovaj sustav radi u proširenom realnom vremenu, a uobičajena predikcija vođenja radi se za 24 sata. Osim toga, ovakve sustave karakterizira i veoma složeni podsustav za prikupljanje i obradu podataka (telemetrija, informatika).

Funkcije ovakvog podsustava su:

1. razmjena podataka s daljinskim stanicama,
2. predobrada podataka (provjera vjerodostojnosti podataka, veličine promjene i dr.),
3. obrada podataka (provjera limita, izračun srednjih vrijednosti, provjera mrtve zone i dr.),
4. nadzor upravljanja,
5. distribucija informacija prema ostalim korisnicima,
6. privremeno arhiviranje podataka (podaci za arhiviranje mogu neko vrijeme biti spremljeni u međuspremniku ukoliko podsustav za arhiviranje nije u funkciji),
7. automatsko izdavanje zahtjeva za ponovni prijenos podataka u slučaju privremenog prekida komunikacije s daljinskim stanicama, [5].



Slika 4 Struktura upravljačko-informacijskog hidrauličkog sustava

5 Zaključak

Potreba za upravljanjem i vođenjem složenih vodno-gospodarskih sustava nameće se iz višestrukih razloga. Za potrebe realizacije ovakvih sustava neophodno je poznavanje odgovarajućih matematičkih modela, koji su zasnovani na hidrauličkim i hidrološkim zakonima nestacionarnog tečenja. Projektiranje upravljanja zasniva se na primjeni pojednostavljenih linearnih sustava s koncentriranim parametrima. Neophodnost integralne optimalizacije sustava danas se u većini primjena zasniva se na strukturi simulator-optimizator. Sklopovska rješenja na razini lokalnog upravljanja rješavaju se primjenom PLC tehnologije, a telemetrijski sustav korištenjem radio ili GSM veza. U mnogim primjerima GSM infrastruktura se

pokazala dugoročno ekonomski prihvatljivijim rješenjem.

6 Literatura

- [1] B. Đorđević, *Cybernetics in Water Resource Management*, Water Resource Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 1993.
- [2] M. Petrićec, J. Margeta, *Model optimalnog upravljanja hidroenergetskim akumulacijama*, Hrvatske vode, Vol. 7. No 26, 1999.
- [3] J. Schuurmans, *Control of Water Levels in Open-Channels*, Thesis, Faculty of Civil Engineering, Group of Water Management, CN Delft, 1997.
- [4] P-O. Malaterre, *Modelisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation*, Thesis I ENGREF, CEMAGREF, 1994.
- [4] M. Brezovec, D. Kuča, G. Bužić, M. Slunjski, *Komanda lanca Varaždin – centar daljinskog nadzora i upravljanja hidroelektranama na rijeci Dravi*, Energija, Vol. 51. No 4, 2002.