

Bespilotne ronilice – identifikacija i upravljanje

Nikola Mišković

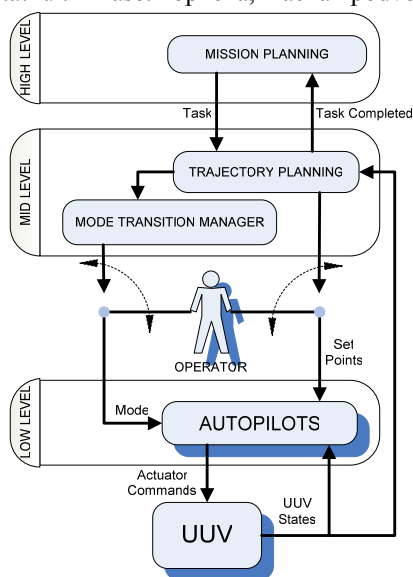
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva,
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska
E-mail: nikola.miskovic@fer.hr

Sažetak—Rad opisuje trenutno stanje istraživanja na identifikaciji i upravljanju ronilicama. Uz postupak određivanja modela ronilice, detaljno je opisana metoda određivanja parametara funkcija prijenosa proizvoljnog reda i oblika (astatizam, kašnjenje, diskretni sustav) korištenjem vlastitih oscilacija. Na kraju je predstavljena metoda primjenjena i na nelinearnoj diferencijalnoj jednadžbi zaošijanja ronilice. Na taj način se pokazalo da se metoda vlastitih oscilacija može iskoristiti i za određivanje parametara određene klase nelinearnih sustava.

Ključne riječi: ronilica, autonomno vozilo, identifikacija, vlastite oscilacije, autotuning

I. UVOD

Procvat tehnologije bespilotnih vozila se dogodio u trenutku kada su računala postala dovoljno snažna da u stvarnom vremenu obrađuju veliku količinu podataka koja je neophodna za autonomno gibanje. Ako se razmisli o tome koliko informacija iz svoje okoline čovjek prihvaća (svjesno ili nesvjesno) i analizira, jasno je da ukoliko se želi ostvariti autonomno robotsko gibanje, veliki broj senzora treba biti uključen. Autonomna vozila se u grubo mogu svrstati u tri klase: kopnena, zračna i podvodna.



Slika 1. Upravljačka hijerarhija

Slika 1 predstavlja klasični prikaz upravljačke hijerarhije. Na najnižem nivou se nalaze autopiloti, odnosno regulatori koji osiguravaju držanje željene ravnotežne točke, i/ili praćenje zadane trajektorije. Te točke mogu biti zadane od strane operatora (ukoliko se radi o daljinski upravljanim vozilima), ili od strane višeg (srednjeg) nivou koji je prvenstveno zadužen za planiranje

trajektorije. Na najvišem nivou nalazi se planiranje misije kao nadređeni sustav odlučivanja.

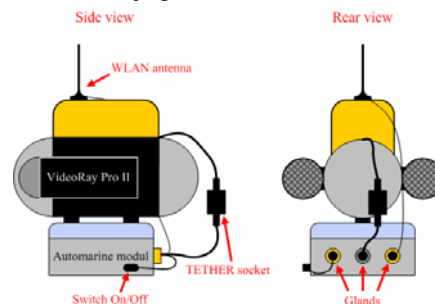
Ovaj članak predstavlja bespilotnu autonomnu ronilicu i nove metode matematičkog modeliranja istih. Najveći problem kod upravljanja podvodnim vozilima su poremećaji, nelinearnost i spregnutost sustav. Često se dinamika podvodnog vozila mijenja iz misije u misiju zbog potrebe za različitim sensorima. Iz ovog razloga javlja se potreba za identifikacijskim algoritmima koji brzo daju model sustava i na taj način omogućavaju projektiranje regulatora.

Poglavlje III ukratko daje opis bespilotne ronilice *VideoRay Pro II* i autonomizacijskog modula (*Automarine* modul) koji je razvijen na FER-u. U poglavlju II je opisan matematički model podvodnih objekata koji je podijeljen na modeliranje upravljačkih uređaja, kinematiku i dinamiku ronilice. U istom poglavlju je prikazan i postupak identifikacije zaošijanja (engl. yaw) ronilice. Poglavlje IV opisuje novi pristup jednostavnom načinu određivanja parametara sustava (autotuning) koji je pogodan za brzo projektiranje regulatora, i prikazuje modifikacije uvedene u razvijeni opći matricni algoritam. U poglavlju V je autotuning algoritam opisan za primjenu na ronilicama, posebice je naglasak stavljen na određivanje parametara nelinearne diferencijalne jednadžbe koja opisuje zaošijanje ronilica. Poglavlje VI zaključuje članak i daje smjernice za budući rad.

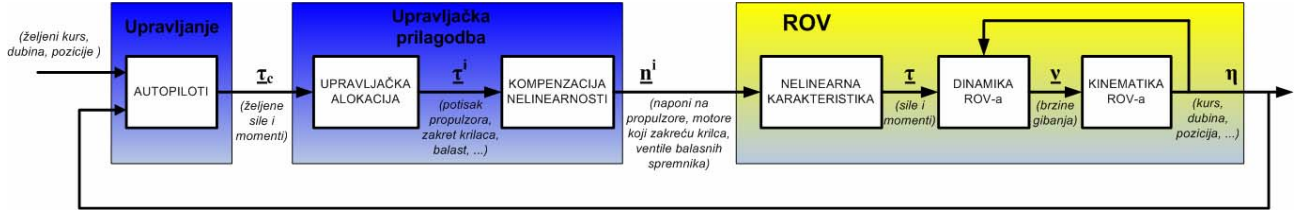
II. AUTONOMIZIRANA BESPILOTNA RONILICA *VIDEORAY*

Ronilica *VideoRay* spada u klasu mikro ronilica i ona se pretežno koristi za inspekcije podvodnih objekata. Njezina težina je oko 3.5kg i opremljena je sa dva horizontalna potisnika, jednim vertikalnim potisnikom, dvjema kamerama (prednja u boji i stražnja crno-bijela). Maksimalna unaprijedna brzina koju postiže u normalnoj izvedbi je oko 2 čvora. *VideoRay* ronilica u osnovnoj izvedbi je kablom povezana sa upravljačkom konzolom koja se nalazi na kopnu.

Autonomna *VideoRay* ronilica je izvedena korištenjem *Automarine* modula koji je razvijen u istraživačke svrhe u Laboratoriju za podvodne sustave i tehnologije na FER-u. Autonomna ronilica je prikazana slikom 2.



Slika 2. *VideoRay* ronilica i *Automarine* modul za autonomizaciju



Slika 3. Načelna shema upravljanja bespilotnim ronilicama (ROV)

Za komunikaciju između *VideoRay Pro II* ronilice i *Automarine* modula korišten je dvožični diferencijalni Controller Area Network (CAN) [1]. Ugrađeno računalo koje se nalazi u *Automarine* modulu je Wafer LX-800 single-board računalo kojeg goni 500MHz processor niske snage koji ne zahtjeva aktivno hlađenje. Računalo je opremljeno sa 1GB RAM-a i 80GB čvrstog diska. Korisnik može komunicirati sa *Automarine* modulom preko bežične (WLAN) mreže (ona je dostupna samo kada je ronilica na površini). U samom *Automarine* modulu nalazi se server napisan u LabVIEW programskom jeziku, kojemu može pristupiti svaki korisnik pomoću klijentskog programa razvijenog u istom jeziku. Za detalje o izvedbi autonomizacijskog modula vidi [31].

III. MATEMATIČKI MODEL BESPILONIH RONILICA I IDENTIFIKACIJA

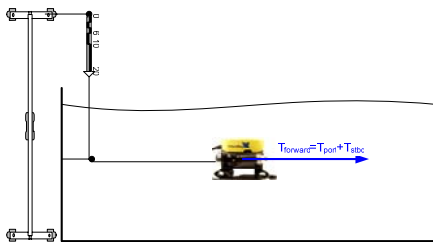
Kao što je prikazano slikom 3, model ronilice može se rastaviti na tri međusobno povezana dijela: nelinearna karakteristika upravljačkog uređaja (to je uobičajeno kormilo ili potisnici, a u nastavku će se obrađivati slučaj sa potisnicima), kinematika i dinamika ronilice (ovi dijelovi opisuju karakteristike samog tijela).

A. Nelinearni model potisnika

Prema [20], sila koju daje potisnik može se opisati sa

$$\tau = b_1 |n|n - b_2 |n|v \quad (1)$$

gdje su b_1 i b_2 pozitivne konstante. Ovaj nelinearni model potisnika se zove *bilinearni model* i ovisi o unaprijednoj brzini plovila. Model potisnika se može pojednostaviti ako se koristi *afin model* oblika $\tau = b|n|n$. U ovom slučaju, unaprijedna brzina je zanemarena. Ovaj model je znatno primjenjiviji u praksi, pogotovo ako su brzine gibanja male. U nekim slučajevima, korisno je koristiti modele koji uključuju i linearnu ovisnost o brzini vrtnje. Gore navedeni modeli su izvedeni pod pretpostavkom da potisnik daje jednak potisak vrtnjom u oba smjera.



Slika 4. Eksperiment mapiranja potisnika

U velikoj većini slučajeva, to nije istina stoga se ukupni model potisnika u složenijem obliku, može prikazati kao

$$\tau^i = \begin{cases} a_f |n|n + b_f n, & n > 0 \\ a_b |n|n + b_b n, & n < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

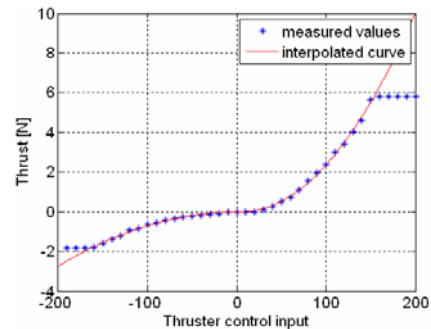
gdje donji indeksi f i b označavaju 'naprijed' ('forward') i nazad ('backward') a gornji indeksi $i = \{port, stbd\}$.

Određivanje statičke karakteristike potisnika, odnosno pronalazak veze između upravljačkog signala narinutog na potisnik, i sile koju isti stvara zove se u mapiranje potisnika.

Mapiranje potisnika se sastoji u tome da se oba potisnika pobude jednakim upravljačkim signalom, što za posljedicu ima gibanje prema naprijed. Na vozilo su spojeni dinamometri, kako je prikazano slikom 4, da bi se izmjerio ukupan potisak. Ukupan potisak prema naprijed, odnosno natrag, koji je dobiven eksperimentom je prikazan slikom 5. Točke predstavljaju izmjerene vrijednosti, a puna linija prikazuje aproksimaciju izmjerenih vrijednosti. Ekstrapolacijom dobivenih točaka može se dobiti bilinearni ili afin model potisnika. U praksi je prilično složeno mjeriti potisak pojedinog potisnika, pa se koristi pretpostavka da su potisnici jednaki.

Iz slike 3 se vidi da u upravljačkoj prilagodbi postoji blok za kompenzaciju nelinearnosti potisnika. Ta kompenzacija se realizira umetanjem inverzne karakteristike pojedinog potisnika, tj. $n^i = f^{-1}(\tau)$. Za bilinearni model, kompenzacijska funkcija svakog potisnika je oblika

$$f^{-1}(\tau^i) = \begin{cases} -\frac{b_f}{2a_f} \left(1 - \sqrt{1 + 4 \frac{a_f}{b_f^2} |\tau^i|} \right), & \tau^i > 0 \\ -\frac{b_b}{2a_b} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \frac{a_b}{b_b^2} |\tau^i|} \right), & \tau^i < 0 \end{cases} \quad (3)$$



Slika 5. Rezultat mapiranja potisnika

B. Kinematički model ronilice

Kinematički model daje vezu među brzinama u mobilnom koordinatnom sustavu (vezanom uz vozilo) i derivacija pozicija i kuteva u fiksnom koordinatnom sustavu. Prema terminologiji u [20], vektor pozicija i kuteva podvodnog vozila ${}^E \boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ definira se u fiksnom koordinatnom sustavu (E) a vektor linearnih i kutnih brzina ${}^B \mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ definiraju se u mobilnom koordinatnom sustavu (B). Jednadžbe (4) opisuju ukupni spregnuti kinematički model.

$$\begin{bmatrix} {}^E \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ {}^E \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1({}^E \boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2({}^E \boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{v}_1 \\ {}^B \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow {}^E \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}({}^E \boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}$$

$$\mathbf{J}_1({}^E \boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_2({}^E \boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\theta & s\phi \\ 0 & s\phi c^{-1}\theta & c\phi c^{-1}\theta \end{bmatrix}$$

C. Dinamički model ronilice

Matematički model podvodnih vozila je izrazito spregnut i nelinearan. Opća dinamička jednadžba za podvodna vozila dana je sa (5).

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (5)$$

Matrica $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ predstavlja zbroj matrice masa čvrstog tijela i matrice dodanih masa. Matrica $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ je matrica otpornosti, koja je dijagonalna i uobičajeno ima linearne i kvadratne elemente. Matrica $\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ predstavlja sumu matrica Coriolisovih sila čvrstog tijela i dodane mase, vektor \mathbf{g} predstavlja gravitacijske i sile uzgona, vektor $\boldsymbol{\tau}$ sastoji se od vanjskih sila i momenata koje djeluju na podvodno vozilo i $\boldsymbol{\tau}_d$ je vektor poremećaja.

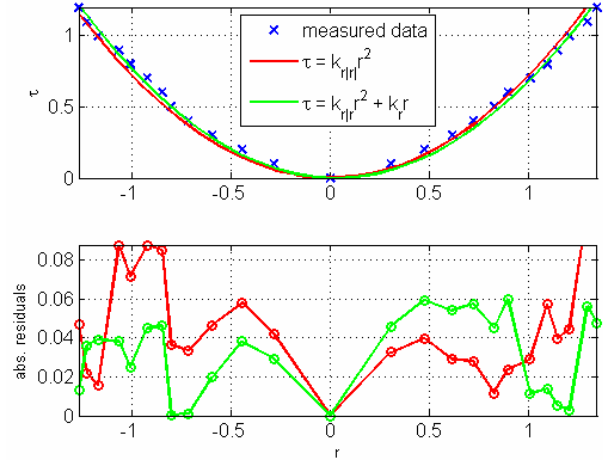
U nastavku je naglasak stavljen na identifikaciju zaošijanja bespilotne autonomizirane ronilice. Zaošijanje podvodnih objekata se može iz (5) prikazati općenitom diferencijalnom jednadžbom oblika

$$I_r \dot{r} + D(r)r = \tau. \quad (6)$$

D. Određivanje hidrodinamičkog otpora

Općenito član $D(r)$ predstavlja hidrodinamički otpor koji se u praksi prikazuje na tri načina:

- $D(r) = k_r$ - ovaj prikaz se koristi kada se objekt giba malim brzinama, odnosno kada su hidrodinamički efekti zanemarivi
- $D(r) = k_{r|r}|r| + k_r$ - ovo je općeniti prikaz koji se rijetko koristi u praksi zbog složenosti proračuna



Slika 6. Rezultati identifikacije statičkog pojačanja.

- $D(r) = k_{r|r}|r|$ - ovaj prikaz je najuobičajeniji u praksi zato jer dobro opisuje nelinearna svojstva gibanja podvodnih tijela zbog utjecaja hidrodinamičkih efekata, a s druge strane proračun je znatno jednostavniji.

Iznos hidrodinamičkog otpora, kao i njegova karakteristika mogu se odrediti nizom eksperimenata u stacionarnom stanju. Ronilica se pobuđuje iznosima normiranog momenta u rasponu $[-1.2, 1.2]$ sa korakom od 0.1. Za svaki od ovih momenata snima se odziv kursa ronilice. Zbog astatičkog karaktera ovakvog sustava, odziv će biti stalno rastući. Eksperimentalno dobivena statička karakteristika prikazana je slikom 6.

Na slici 6 plavi križići određuju točke na karakteristici koje su dobivene eksperimentom. Crvena linija pokazuje čistu kvadratnu karakteristiku koja najbolje opisuje dobivene točke, dok zelena boja prikazuje opću kvadratnu karakteristiku koja prolazi kroz ishodište. Iz slike je vidljivo da su razlike između dva modela zanemarive, stoga se u nastavku koristi jednostavniji model sa hidrodinamičkim prigušenjem linearnog oblika.

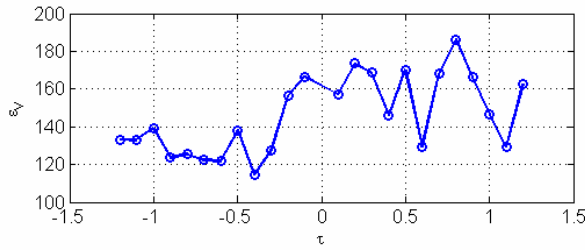
E. Određivanje momenta inercije

Inerciju sustava je nešto teže odrediti. Ideja određivanja ovog parametra leži u određivanju odziva kursa na konstantan moment.

Naime, u linearnom slučaju, diferencijalna jednadžba $I_r \ddot{\psi} + k_r \dot{\psi} = \tau$ ima sljedeće rješenje uz pretpostavku da je početni uvjet na kurs ψ_0 , a početna brzina vrtnje ronilice 0.

$$\psi(t) = \tau \frac{I_r}{k_r^2} e^{-\frac{k_r}{I_r} t} + \frac{\tau}{k_r} t + \psi_0 - \frac{I_r}{k_r^2} \tau \quad (7)$$

Vidimo da u stacionarnom stanju prvi termin iščezava a nagib izlaznog pravca je jednak $\frac{\tau}{k_r}$. Odstupanje stalno rastućeg odziva sustava u stacionarnom stanju, tzv. brzinska pogreška je oblika



Slika 7. Rezultat identifikacije momenta inercije.

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \left[\psi - \frac{\tau}{k_r} t \right] = \psi_0 - \frac{I_r}{k_r^2} \tau. \quad \text{Drugim riječima,}$$

eliminacijom početnog kursa, izlazni kurs će biti iznosom pomaknut u odnosu na pravac nagiba $\frac{1}{k_r}$ za iznos $-\frac{I_r}{k_r^2} \tau$.

Kako je poznat narinuti moment i hidrodinamičko prigušenje, jednostavno je odrediti i moment inercije sustava.

U nelinearnom (realnom) slučaju situacija je nešto složenija. Diferencijalna jednačba je u ovom slučaju oblika

$$\begin{aligned} I_r \dot{r} + k_{r|r} r |r| &= \tau \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (8)$$

Nešto složenijim proračunom dobije se brzinska pogreška oblika

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(\psi - \operatorname{sgn}(\tau) \frac{I_r}{k_{r|r}} t \frac{\sqrt{k_{r|r} |\tau|}}{I_r} \right) = \\ &= -\operatorname{sgn}(\tau) \frac{I_r}{k_{r|r}} \ln 2 \end{aligned} \quad (9)$$

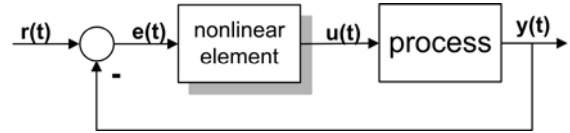
Sada se iz očitane brzinske pogreške i prije izračunatog hidrodinamičkog prigušenja može odrediti moment inercije sustava.

Na slici 7 prikazani su eksperimentalni rezultati za brzinsku pogrešku sustava pri različitim pobudama.

IV. ALGORITAM ZA AUTOTUNING IDENTIFIKACIJU

Autotuning je pristup koji je našao mnoge primjene u industriji. 1942. su Ziegler su Nichols dali prva pravila za podešavanje PID regulatora. Od tada, ostao je alat za podešavanje regulatora u industrijskim procesima.

Autotuning eksperimenti se temelje na oscilacijama sustava. Kada je autotuning prvo uveden, sustav je dovođen u oscilatorni režim tako da ga se dovede na rub stabilnosti korištenjem proporcionalnog regulatora. Tada bi se korištenjem pojačanja regulatora i frekvencije uspostavljenih oscilacija odredili parametri PID regulatora. Budući da dovođenje sustava na rub stabilnosti može biti opasno, sustav se doводи u oscilatorni režim, tzv. vlastite oscilacije, korištenjem nelinearnih elemenata, kao na slici 8.



Slika 8. Shema zatvorenog kruga koja se koristi za autotuning identifikaciju.

A. Autotuning koncept

Za dovođenje sustav u vlastite oscilacije, obično se koristi relej sa histerezom. Algoritam za autotuning identifikaciju će biti razvijen za opću klasu nelinearnih elemenata, dok će simulacijski primjeri biti pokazani na releju sa histerezom.

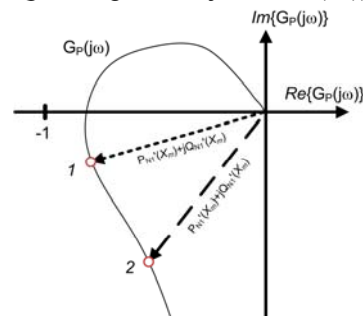
Autotuning identifikacija se svodi na određivanje skupa parametara koji opisuju proces, prikupljanjem podataka dobivenih iz vlastitih oscilacija sustava. Grafo-analiitička procedura se može opisati kako slijedi: treba pronaći presječne točke između frekvencijske karakteristike LTI procesa i inverzne negativne opisne funkcije nelinearnog elementa. Ova metoda je poznata kao Goldfarbova metoda, [17], i dana je sa (10) gdje je $G_N(X_m)$ opisna funkcija, X_m amplitude oscilacija na ulazu u nelinearni element i $G_P(j\omega)$ je frekvencijska karakteristika procesa.

$$G_P(j\omega) = -\frac{1}{G_N(X_m)} = -\frac{1}{P_N(X_m) + jQ_N(X_m)} \quad (10)$$

Za slučaj releja sa histerezom i pod pretpostavkom da su vlastite oscilacije simetrične ([17] i [18]) opisna funkcija je prikazana sa (11) gdje je x_a polovica širine histereze a C je izlaz.

$$\begin{aligned} P(X_m) &= \frac{4C}{\pi X_m} \sqrt{1 - \left(\frac{x_a}{X_m} \right)^2} \\ Q(X_m) &= -\frac{4C}{\pi X_m} x_a \end{aligned} \quad (11)$$

Kada su vlastite oscilacije uspostavljene u zatvorenom krugu, možemo iskoristiti njihovu amplitudu u i frekvenciju za određivanje jedne točke u Nyquistovoj ravnini što je ujedno i jedna točka na Nyquistovoj krivulji procesa, [17]. Ako proces ima maksimalno dva nepoznata parametra i ima poznatu funkciju prijenosa, Nyquistova krivulja se može jednoznačno provući kroz tu točku. Ako je proces složeniji, npr. sastoji se 4 nepoznata parametra, potrebne su dvije točke u Nyquistovoj ravnini, odnosno dva autotuning eksperimenta sa različitim nelinearnim elementima (vidi sliku 9 gdje su P_{N1} , P_{N2} realni i Q_{N1} , Q_{N2} imaginarni dijelovi od (10)).



Slika 9. Presječne točke u Nyquistovoj ravnini.

B. Opći algoritam u matičnom obliku za statičke procese

Linearni vremenski nepromjenjivi proces može se opisati funkcijom prijenosa (12) gdje je n stupanj nazivnika (broj polova različitih od 0), m stupanj brojnika (broj konačnih nula) i $n \geq m$.

$$G_p(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{i=0}^n a_i s^i} \quad (12)$$

Pretpostavimo da je zatvoreni krug kao na slici 8. Korištenjem metode Goldfarba (10) može se odrediti opća jednadžba u frekvencijskoj domeni koja daje vezu između parametara oscilacija (amplitude X_m i frekvencije ω_u) i parametara procesa. Funkcija prijenosa procesa u frekvencijskoj domeni ima sljedeći oblik:

$$G_p(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i(j\omega)^i}{\sum_{i=0}^n a_i(j\omega)^i} = \frac{\left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i} \omega^{4i} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+2} \omega^{4i+2} \right] + j \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+1} \omega^{4i+1} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+3} \omega^{4i+3} \right]}{\left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i} \omega^{4i} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i+2} \omega^{4i+2} \right] + j \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i+1} \omega^{4i+1} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i+3} \omega^{4i+3} \right]} \quad (13)$$

Kombiniranjem (12) i (13), i izjednačavanjem imaginarnih i realnih dijelova, dobiju se sljedeće jednadžbe.

$$\begin{aligned} \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i} \omega^{4i} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i+2} \omega^{4i+2} \right] &= -P \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i} \omega^{4i} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+2} \omega^{4i+2} \right] + Q \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+1} \omega^{4i+1} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+3} \omega^{4i+3} \right] \\ \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i+1} \omega^{4i+1} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} a_{4i+3} \omega^{4i+3} \right] &= -Q \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i} \omega^{4i} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+2} \omega^{4i+2} \right] - P \left[\sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+1} \omega^{4i+1} - \sum_{i=0}^{\lfloor n/4 \rfloor} b_{4i+3} \omega^{4i+3} \right] \end{aligned}$$

Iz ovoga se može zaključiti da jedan autotuning eksperiment daje dvije jednadžbe koje se mogu iskoristiti za identifikaciju.

Ukoliko se napravi dovoljno autotuning eksperimenata tako da se odrede svi nepoznati parametri, posljednje dvije jednadžbe mogu se zapisati u matičnom obliku. U svrhu dobivanja jednoznačnog rješenja matične jednadžbe, postavljamo $a_0=1$. Broj eksperimenata koji se moraju napraviti da se identificiraju svi parametri procesa (13) uz $a_0=1$ je

$$\varepsilon = \left\lceil \frac{n+m+1}{2} \right\rceil \quad (14)$$

Definirajmo tri vektora mjerenja $\omega = [\omega_1 \cdots \omega_\varepsilon]^T$;

$\mathbf{P} = [P_1 \cdots P_\varepsilon]^T$ i $\mathbf{Q} = [Q_1 \cdots Q_\varepsilon]^T$, gdje su članovi P_i i Q_i funkcije eksperimentalno dobivenih amplitude vlastitih oscilacija i parametara nelinearnog elementa, a ω_i su frekvencije vlastitih oscilacija dobivene iz i -tog eksperimenta.

Vektor nepoznatih parametara definira se kao

$$\Theta = [\Theta_a \ \Theta_b]^T = [a_1 \cdots a_n \ | \ b_0 \cdots b_m]^T$$

Iz gore navedenog, slijede sljedeće jednadžbe:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Omega_a \\ \Omega_b \end{bmatrix}}_{\Omega} \Theta = \underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}} \quad (15)$$

gdje

$$\Omega_a = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_\varepsilon & -\mathbf{I}_\varepsilon & \mathbf{0}_\varepsilon & \mathbf{I}_\varepsilon \\ \mathbf{I}_\varepsilon & \mathbf{0}_\varepsilon & -\mathbf{I}_\varepsilon & \mathbf{0}_\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega^1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -(n-1)\%4 \cdot \omega^n \\ \mathbf{0} & \omega^2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -(n-2)\%4 \cdot \omega^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \omega^3 & \mathbf{0} & \cdots & -(n-3)\%4 \cdot \omega^n \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \omega^4 & \cdots & -(n-4)\%4 \cdot \omega^n \end{bmatrix}$$

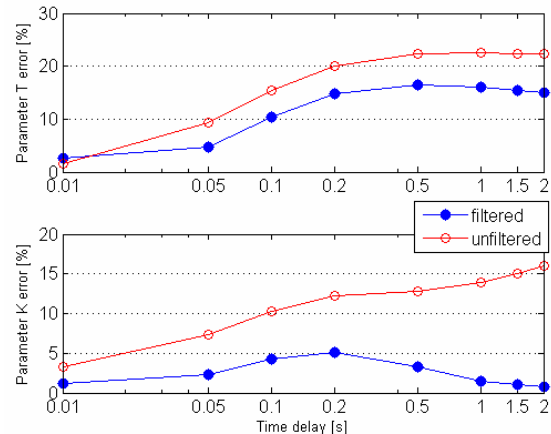
$$\Omega_b = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^T & \mathbf{Q}^T \\ \mathbf{Q}^T & -\mathbf{P}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_\varepsilon & \mathbf{0}_\varepsilon & -\mathbf{I}_\varepsilon & \mathbf{0}_\varepsilon \\ \mathbf{0}_\varepsilon & -\mathbf{I}_\varepsilon & \mathbf{0}_\varepsilon & \mathbf{I}_\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega^0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -m\%4 \cdot \omega^m \\ \mathbf{0} & \omega^1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -(m-1)\%4 \cdot \omega^m \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \omega^2 & \mathbf{0} & \cdots & -(m-2)\%4 \cdot \omega^m \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \omega^3 & \cdots & -(m-3)\%4 \cdot \omega^m \end{bmatrix}$$

i $\mathbf{I}_\varepsilon = \mathbf{I}_{\varepsilon \times \varepsilon}$, $\mathbf{0}_\varepsilon = \mathbf{0}_{\varepsilon \times \varepsilon}$, $\mathbf{0} = \mathbf{0}_{\varepsilon \times 1}$, $\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\varepsilon \times 1}$. Simbol točkica (\cdot^k) označava eksponent po elementima, % je modulo operacija i $-$ je logička negacija. Vektor parametara Θ može se odrediti korištenjem formule $\Theta = \Omega^{-1} \mathbf{Y}$ samo ako postoji paran broj nepoznatih parametara. Ukoliko je neparan broj nepoznatih parametara, matrica Ω će imati jedan redak više nego što je parametara. U tom slučaju, posljednji redak se može isključiti iz jednadžbe, ili se može koristiti pseudo-inverzija, [2].

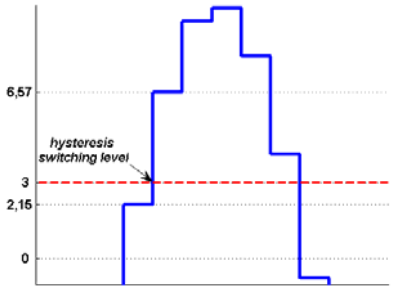
Opisani algoritam je poopćen za statičke procese bilo kojeg reda. Modifikacije predstavljene u nastavku omogućit će korištenje općeg algoritma za astatičke, diskretne i procese sa kašnjenjem, bez mijenjanja matičnog prikaza.

C. O višim harmonicima i filtriranju signala

Viši harmonici su uvijek prisutni u realnim sustavima. Glavna pretpostavka u metodi opisne funkcije je da ulazni signal u nelinearni element sadrži samo jedan harmonik, tj. da je proces dobar nisko-propusni filter, [17]. Procesi sa integratorom su dobri nisko-propusni filtri zbog velikog gušenja integratora na visokim frekvencijama, stoga su viši harmonici dobro prigušeni. Vlastite oscilacije u sustavima sa kašnjenjem često sadrže više harmonike, tj. oscilacije nisu monoharmonične. Iz ovoga se zaključuje da bi bolji rezultati bili dobiveni ako se dobivene oscilacije filtriraju. Za detaljan opis postupka filtriranja vlastitih oscilacija, vidi [30]. Na slici 10 prikazani su simulacijski rezultati pogreške identificiranih parametara sa i bez filtriranja vlastitih oscilacija.



Slika 10. Usporedba pogrešaka identifikacije sa i bez filtriranja vlastitih oscilacija.



Slika 11. Ilustracija pogreške u diskretnim sustavima.

D. Modifikacija za sustave sa astatizmom k -tog reda

Neka proces (12) ima k integratora, $G_p^*(s) = G_p(s) \frac{1}{s^k}$.

Korištenjem (10) za ovaj tip sustava, dobije se

$$-[P_i + jQ_i] = \frac{1}{G_p^*(j\omega_i)}$$

za i -ti eksperiment, što vodi na

$$\begin{aligned} \frac{1}{G_p(j\omega_i)} &= -(j\omega_i)^{-k} (P_i + jQ_i) = \\ &= -(P_i^* + jQ_i^*) \end{aligned}$$

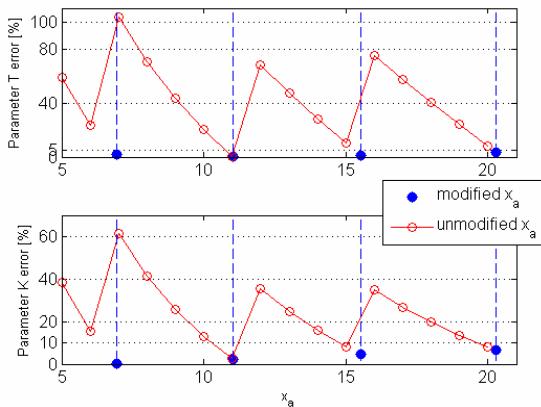
Novi parametri opisne funkcije mogu se zapisati u matičnom obliku kao

$$\begin{bmatrix} P_i^* \\ Q_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_i^{-1} \\ -\omega_i^{-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix}$$

Ovaj pristup je praktičan jer se opći algoritam razvijen za astatičke sustave može jednostavno modificirati za sustave sa k integratora. Jedini parametri koji se mijenjaju su P_i i Q_i , tj. vektor parametara opisne funkcije. Ovu modifikaciju može se promatrati i kao rotaciju originalnog vektora za 90° i pomnoženje sa ω^{-1} za svaki integrator.

E. Modifikacija algoritma za diskretne sustave

Kada se autotuning identifikacija koristi u praksi, proces je obično računalno upravljani. Iz tog razloga se javlja potreba za modifikacijom algoritma. Neka relej treba promijeniti stanje kada je ulaz 3 (tj. $x_a=3$). Može se dogoditi da u nekom vremenskom trenutku k ulaz ima iznos 2.15 a u $k+1$ ima iznos 6.57, vidi sliku 11. Budući da u trenutku k ulaz u relej još nije dostigao vrijednost pri kojoj relej mijenja stanje, to će se dogoditi u trenutku $k+1$.



Slika 12. Usporedba pogrešaka identifikacije sa i bez modifikacije algoritma za diskretne sustave (vrijeme uzorkovanja je 0.1s).

Drugim riječima, ovo je isto kao da histereza ima parametar x_a vrijednosti 6.57, što je više od dvostruko pretpostavljene vrijednosti, stoga treba očekivati krive rezultate. Jednako tako se može dogoditi da se promjena izlaza releja dogodi u pretpostavljenom trenutku, što će rezultirati točnom identifikacijom. Budući da se a priori ne može znati kakvi će biti rezultati identifikacije, treba provesti korekciju širine histereze, nakon što je eksperiment završio.

Slike 12 i 13 prikazuju pogreške identificiranih parametara sa i bez modifikacije za diskretne sustave i to za slučaj dva vremena uzorkovanja. Jasno je da su rezultati bolji uz modoficiranu širinu histereze. Isto tako, je jasno da uz veće vrijeme uzorkovanja, i pogreška će biti veća jer su veće šanse da relej ne promijeni izlaz u točno željenom trenutku.

F. Modifikacija algoritma za sustave sa kašnjenjem

U ovom radu se pretpostavlja da je iznos vremena kašnjenja poznat.

Neka proces (12) ima vrijeme kašnjenja, $G_p^*(s) = G_p(s)e^{-sT_d}$. Korištenjem metode Goldfarba za sustave u zatvorenoj petlji sa nelinearnim elementom, mogu se napisati sljedeće jednadžbe:

$$\begin{aligned} \frac{1}{G_p(j\omega_i)} &= -e^{-j\omega_i T_d} (P_i + jQ_i) = \\ &= -(P_i^* + jQ_i^*) \end{aligned}$$

Slučaj kada u sustavu postoji vrijeme kašnjenja je slučan slučaju sa k integratora – može ga se promatrati kao rotacija vektora opisne funkcije, kao što je prikazano slikom 14. Novi nelinearni element koji treba koristiti u algoritmu, može se napisati u matičnom obliku kao

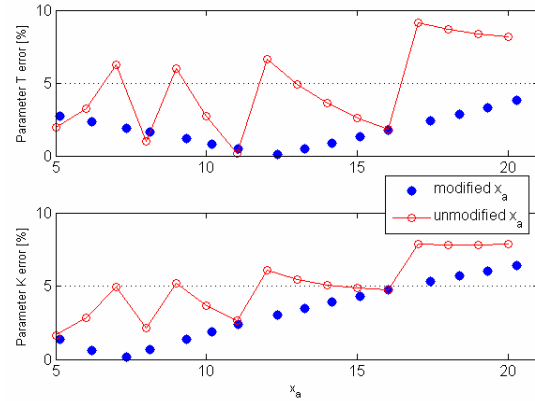
$$\begin{bmatrix} P_i^* \\ Q_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_i T_d & \sin \omega_i T_d \\ -\sin \omega_i T_d & \cos \omega_i T_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \mathbf{T}_d \begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix}$$

Za razliku od slučaja sa integratorima, ova transformacija ne mijenja amplitude opisne funkcije, već samo njezin kut.

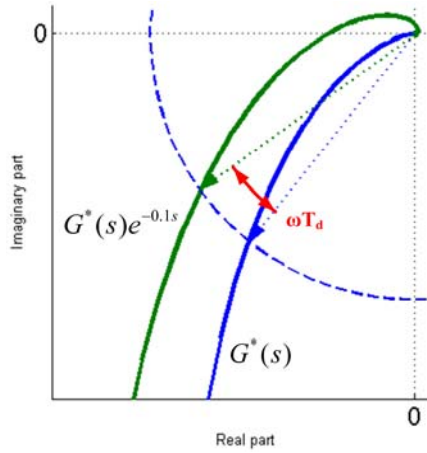
U nastavku su pokazani rezultati simulacije za slučaj prisustva vremena kašnjenja u sustavu. Neka je sustav

$$G(s) = \frac{50}{s(0.3s+1)} e^{-0.1s}$$

zadan kao primjer, i radi u režimu vlastitih oscilacija. Pogreške koje se javljaju kada je vrijeme kašnjenja zanemareno, su ogromne. Uz modifikaciju algoritma, rezultati su znatno točniji.



Slika 13. Usporedba pogrešaka identifikacije sa i bez modifikacije algoritma za diskretne sustave (vrijeme uzorkovanja je 0.1s).



Slika 14. Utjecaj vremena kašnjenja – rotacija vektora opisne funkcije.

V. AUTOTUNING IDENTIFIKACIJA ZA PODVODNE OBJEKTE

U prethodnom poglavlju, izveden je opći algoritam za određivanje parametara funkcije prijenosa. Implicitno, ovo znači da se metodom vlastitih oscilacija mogu odrediti parametri samo linearnih sustava. Nešto kasnije pokazat će se da se parametri sustava mogu odrediti i za određenu klasu nelinearnih sustava.

Ukoliko se ošijanje ronilice može prikazati linearnim modelom, tj. $I_r \ddot{\psi} + k_r \dot{\psi} = \tau$, tada korištenjem općeg matricnog algoritma možemo doći do nepoznatih parametara kako slijedi.

$$I_r = \frac{P_N}{\omega^2}$$

$$k_r = -\frac{Q_N}{\omega}$$

U slučaju da je ošijanje ronilice nelinearnog karaktera oblika $I_r \ddot{\psi} + k_{r|p|} \dot{\psi} |\dot{\psi}| = \tau$ tada je postupak identifikacije parametara kako slijedi. Ako je sustav u režimu vlastitih oscilacija, tada se može napisati

$$\psi = X_m \sin(\omega t)$$

$$\dot{\psi} = X_m \omega \cos(\omega t) = j X_m \omega \sin(\omega t)$$

$$\ddot{\psi} = -X_m \omega^2 \sin(\omega t)$$

Uvrštavanjem u nelinearnu jednadžbu sustava dobije se

$$-I_r X_m \omega^2 \sin(\omega t) + k_{r|p|} X_m^2 \omega^2 \underbrace{\cos(\omega t) |\cos(\omega t)|}_{\frac{8}{3\pi} \cos(\omega t) = j \frac{8}{3\pi} \sin(\omega t)} = -G_N X_m \sin(\omega t)$$

Umnožak dvaju kosinusa može se razviti u Fourierov red (na isti način kako se dobiva opisna funkcija nelinearnog elementa) što daje

$$-I_r \omega^2 + k_{r|p|} X_m \omega^2 j \frac{8}{3\pi} = -P_N - j Q_N$$

Oдавde se mogu odrediti nepoznati parametrici kako slijedi:

$$I_r = \frac{P_N}{\omega^2}, k_{r|p|} = -\frac{Q_N}{X_m \omega^2} \frac{3\pi}{8}$$

Sada se može zaključiti da je u oba slučaja moment inercije jednak, dok su relacije za hidrodinamički otpor različite. Ovaj izračun pokazuje da se jednostavnim autotuning testom može doći do modela ronilice koji se lako može iskoristiti za projektiranje autopilota (regulatora).

VI. ZAKLJUČAK I BUDUĆI RAD

U članku je predstavljen rad na bespilotnoj ronilici koji uključuje identifikaciju modela u svrhu projektiranja regulatora. Metoda korištenjem vlastitih oscilacija se pokazala prikladnom za in situ određivanje parametara sustava. Modifikacije koje su uvedene u izvedeni opći matricni algoritam pokazale su poboljšanje u određivanju parametara. Isto tako, pokazalo se da se ova metoda može iskoristiti i za identifikaciju parametara određene klase nelinearnih sustava.

Daljni rad će obuhvaćati primjenu metode vlastitih oscilacija i na preostale upravljive stupne slobode: zaranjanje (engl. heave) i napredovanje (engl. surge). Algoritmi identifikacije i upravljanja bespilotnom ronilicom će se nastaviti izvoditi u LabVIEW programskom paketu, jer se pokazao vrlo jednostavnim i praktičnim za hardware-in-the-loop aplikacije.

Nakon detaljne analize i primjene predložene metode na bespilotne ronilice, analizirat će se pogreške koje se javljaju pri identifikaciji parametara. Ove inherentne neizvjesnosti koristit će se za projektiranje robusnih regulatora. Metoda koja se nameće samo po sebi kao izuzetni primjenjiva u praksi je QFT metoda.

REFERENCE

- [1] J. G. Ziegler i N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME* 1942, 64, 759.
- [2] Z. Vukić i Lj. Kuljača, *Automatic control – analysis of linear systems*, 2005. (in Croatian)
- [3] K. J. Åström i T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase i amplitude margins," *Automatica* 1984, 20, 645.
- [4] W. L. Luyben, "Derivation of transfer functions for highly nonlinear distillation columns," *Ind. Eng. Chem. Res.* 1987, 26, 2490.
- [5] W. Li, E. Eskinat i W. L. Luyben, "An improved autotune identification method," *Ind. Eng. Chem. Res.* 1991, 30, 1530.
- [6] R. S. Chang, i C. Y. Shen, "Derivation of transfer function from relay feedback systems," *Ind. Eng. Chem. Res.* 1992, 31, 855.
- [7] N. Mišković, Z. Vukić i M. Barišić, "ROV identification by use of self-oscillations" (submitted to IFAC CAMS 2007 conference)
- [8] K. K. Tan, T. H. Lee i Q. G. Wang, "An enhanced automatic tuning procedure for PI/PID controllers for process control," *AIChE Journal* 1996, 42 (9), 2555.
- [9] A. Besançon-Voda i H. Roux-Buisson, "Another version of the relay feedback experiment," *Journal of Process Control* 1997, 7 (4), 303.
- [10] Y. H. Kim, "PI controller tuning using modified relay feedback method," *J. of Chem. Eng. of Japan* 1995, 28, 118.
- [11] Q. G. Wang, C. C. Hang i B. Zou, "Low-order modelling from relay feedback," *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36 (2), 375.
- [12] C. C. Hang, Q. G. Wang i L. S. Cao, "Self-tuning Smith predictors for processes with long dead time," *Int. J. Adaptive Control i Signal Processing* 1995, 9 (3), 255.
- [13] L. Wang, M. L. Desarmo i W.R. Cluett, "Real-time estimation of process frequency response i step response from relay feedback experiments," *Automatica* 1999, 35, 1427.

- [14] Q. G. Wang, C. C. Hang i Q. Bi, "Process frequency response estimation from relay feedback," *Control Engineering Practice* 1997, 5 (9), 1293.
- [15] I. Kaya i D. P. Atherton, "Parameter estimation from relay autotuning with asymmetric limit cycle data," *Journal of Process Control* 2001, 11, 429.
- [16] H. J. Kwak, W. S. Sung i I.-B. Lee, "On-line process identification i autotuning for integrating processes," *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 5329-5338
- [17] Z. Vukić, Lj. Kuljača, D. Đonlagić i S. Tešnjak, *Nonlinear Control Systems*, Marcel Dekker Inc., 2003.
- [18] N. Mišković, Z. Vukić, M. Barišić i B. Tovornik, "Autotuning autopilots for micro-ROVs," MED'2006, Ancona 28-30. June 2006.
- [19] Y. Z. Tsympkin *Relay Control Systems*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1984.
- [20] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, 1994.
- [21] P. Ridaio, A. Tiano, A. El-Fakdi, M. Carreras, A. Zirilli, "On the identification of non-linear models of unmanned underwater vehicles", *Control Engineering Practice* 12, (2004), 1483-1499.
- [22] M. Caccia, G. Casalino, R. Cristi, G. Veruggio, "Acoustic motion estimation and control for an unmanned underwater vehicle in a structured environment", *Control Engineering Practice* 6, (1998), 661-670.
- [23] M. Caccia, G. Indiveri i G. Veruggio, "Modelling and identification of open-frame variable configuration underwater vehicles", *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 25(2), (2000) 227-240
- [24] M. Carreras, P. Ridaio, R. Garcia i T. Nicosevici, "Vision-based localization of an underwater robot in a structured environment", *IEEE International conference on robotics and automation, ICRA '03*, Taipei, Taiwan
- [25] Z. Vukić, Lj. Kuljača. *Automatic control – analysis of linear systems*, -2005. (in Croatian)
- [26] Z. Vukić, Lj. Kuljača, D. Đonlagić, S. Tešnjak, *Nonlinear control systems*, 2003., New York: Marcel Dekker
- [27] *MATLAB® Tutorial*, The MathWorks, Inc.
- [28] L. Ljung, *System Identification – Theory for the user*, 2nd ed., Prentice Hall, 1999.
- [29] N. Mišković, Z. Vukić i M. Barišić, "Identification of coupled mathematical models for underwater vehicles" OCEANS'07, Aberdeen, Scotland, UK
- [30] N. Mišković, Z. Vukić i M. Barišić, "Transfer function identification by using self-oscillations" MED'07, Athens, Greece
- [31] M. Stipanov, Z. Fabeković i Z. Vukić, "Automarine Module – the Videoray Pro II auonomization module", ELMAR'07, Zadar, Hrvatska