

*mr. sc. Vedran Bakarić, Brodarski institut, Av. V. Holjevca 20, Zagreb*  
*prof. dr. sc. Zoran Vukić, FER, Unska 3, Zagreb*  
*dr. sc. Sadko Mandžuka, Brodarski institut, Av. V. Holjevca 20, Zagreb*

## **REKONFIGURABILNO UPRAVLJANJE ZA BESPILOTNE RONILICE**

### **Sažetak**

Kako bi se proširila i olakšala upotreba bespilotnih ronilica, u njihov upravljački sustav uvodi se sve veća i složenija automatizacija. Jedna od atraktivnih novih tehnika pogodnih za ronilice jest rekonfigurabilno upravljanje, čija je zadaća automatizirana brza prilagodba upravljačkog sustava na iznenadne i brze promjene koje mogu nastati u upravljanom sustavu. Između ostalog, rekonfigurabilno upravljanje omogućava ronilici da nastavi svoju misiju nakon djelomičnog ili potpunog otkaza nekog senzora ili aktuatora, pod uvjetom da postoji odgovarajuća redundancija. U radu se detaljno opisuje za rješavanje kojih problema se može upotrijebiti rekonfigurabilno upravljanje, poslije čega je dan pregled prikladnih metoda za primjenu na bespilotnim ronilicama.

*Ključne riječi: bespilotna ronilica, rekonfigurabilno upravljanje, prilagodba na otkaz*

## **RECONFIGURABLE CONTROL FOR UNMANNED UNDERWATER VEHICLES**

### **Summary**

The degree and complexity of automation of the control system of unmanned underwater vehicles (UUVs) have been steadily growing in order to enhance and simplify their usage. Reconfigurable control is one of attractive new techniques suitable for UUV automation. The task of reconfigurable control is automated and quick adaptation to sudden and large changes possible in the controlled system. Between other, reconfigurable control enables the vehicle to continue with its mission after a partial or total failure of a sensor or actuator, if appropriate redundancy is existent. The paper describes in detail which problems can be addressed by reconfigurable control and gives an overview of methods appropriate for UUV applications.

*Key words: unmanned underwater vehicle, reconfigurable control, fault accommodation*

## 1. Uvod

Rekonfigurabilno upravljanje (*reconfigurable control*) je novo područje u teoriji automatskog upravljanja, tijesno povezano sa adaptivnim (*adaptive*), inteligentnim (*intelligent*) i na kvar tolerantnim (*fault-tolerant*) upravljanjem [1]. Njegov je zadatak obaviti automatiziranu i brzu rekonfiguraciju (krupnu promjenu, adaptaciju) sustava automatskog upravljanja kada se za njom ukaže potreba, to jest nakon nagle ili velike promjene u sustavu upravljanja, upravljanoj sustavu ili njegovoj okolini. Promjena zbog koje je potrebna rekonfiguracija najčešće je neželjena i neočekivana: pojava kvara u sustavu ili iznenadnog poremećaja u okolini [2]. Rekonfigurabilno upravljanje koristi se pored toga i za prilagodbu upravljačkog sustava na planirane ili namjerno izazvane velike promjene, kao što je promjena radnog režima ili fizičke konfiguracije upravljanoj sustava [3]. Suštinska razlika između ova dva slučaja je u tome što za reakciju na planirane promjene nije potrebna automatizirana detekcija pojave promjene i njezino prepoznavanje (identifikacija), ali u samom mehanizmu rekonfiguracije nema bitnije razlike. Krajnji cilj rekonfiguriranja sustava automatskog upravljanja jeste ostvariti čim je moguće veću kvalitetu upravljanja nakon promjene, a u najmanju ruku zadržati upravljivost, stabilnost i sigurnost upravljanoj sustava.

Rekonfigurabilno upravljanje namijenjeno je prije svega za sustave za koje je od velike važnosti da mogu izbjeći ili odgoditi forsirano brzo gašenje zaštitom, odnosno iznenadni prekid rada, nakon pojave nekog relativno malog kvara ili poremećaja uz kojeg je rad sustava još teoretski sasvim moguć. Također je od značajne koristi pri upravljanju sustavima od kojih se traži da glatko prolaze kroz mnogo vrlo različitih radnih režima ili čak fizičkih konfiguracija. Oba ova zahtjeva kritična su kod upravljanja letjelicama, pa stoga ne čudi što je velik dio istraživanja i primjena metodologije rekonfigurabilnog upravljanja dosada bio vezan uz razvoj eksperimentalnih verzija i prototipova zrakoplova, helikoptera i različitih bespilotnih letjelica. Ostala važna područja primjene jesu druge vrste naprednih gibajućih objekata, pogotovo daljinski upravljana ili autonomna vozila bez posade (plovila i ronilice, roveri i kopnena vozila, sateliti i dr); zatim robotski sustavi i manipulatori, za koje su karakteristični veliki broj radnih režima i promjenljivost fizičke konfiguracije; te industrijski procesi (energetika, kemijska i prehrambena industrija i dr.) gdje iznenadni prekidi rada pogona mogu prouzročiti velike ekonomske gubitke.

## 2. Metode rekonfigurabilnog upravljanja

Princip rekonfiguriranja složenijeg sustava automatskog upravljanja prikazan je na slici 1. Upravljački sustav dobiva informaciju o stanju upravljanoj sustava (procesa) putem senzora (mjernih osjetila), a na njega djeluje putem aktuatora (izvršnih članova). Informacija sa senzora se prvo prihvaća, filtrira i obrađuje u bloku za obradu senzoričke informacije. Blok vođenja nalazi referentne signale, to jest željene vrijednosti pojedinih varijabli stanja procesa (npr. položaj, brzina, temperatura i sl.). Blok regulacije na temelju usporedbe željenog i ostvarenog stanja procesa nalazi upravljačke signale, koji odgovaraju potrebnim upravljačkim veličinama kojima će aktuatori djelovati na proces (npr. sila, toplinska energija i dr.). Blok alokacije upravljanja raspoređuje potrebnu upravljačku akciju na pojedine aktuatore.

Intervencija rekonfigurabilnog upravljanja uvodi promjene u neki od blokova sustava automatskog upravljanja, ili u više njih. Ona se svodi na promjenu strukture (različitih algoritama, senzora, aktuatora i načina njihovog povezivanja), ili parametara (numeričkih konstanti u danom algoritmu), ili signala (modifikacija signala putem injekcije dodatnih adaptacijskih signala u njega) sustava automatskog upravljanja. Ona može obuhvaćati veće ili manje promjene u različitim dijelovima zakona upravljanja, uključivanje i isključivanje različitih softverskih modula unutar sustava upravljanja, promjene u konfiguraciji korištenih senzora i aktuatora, ili izmjenu samih ciljeva upravljanja.

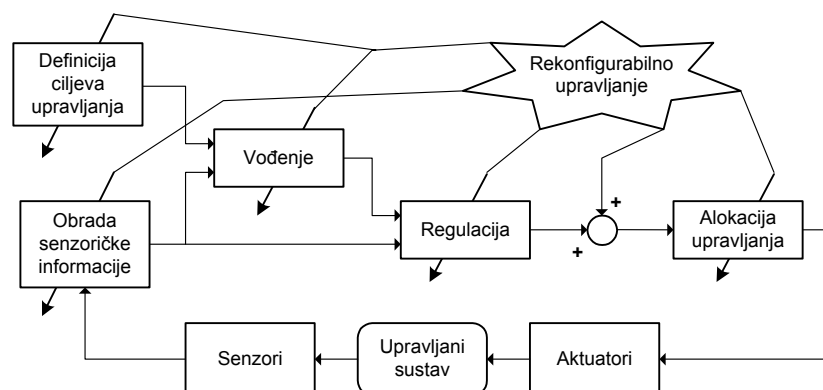


Fig. 1 Reconfiguring of a complex system of automatic control

Slika 1. Rekonfiguriranje složenog sustava automatskog upravljanja

Pritom se razlikuju tri osnovna pristupa [4]. Pristup najkarakterističniji za rekonfigurabilno upravljanje unaprijed priprema odgovore za različite anticipirana (unaprijed prepoznata i modelirana) moguća stanja upravljanog sustava – različite radne režime i potencijalne kvarove. Rekonfiguriranje sustava automatskog upravljanja se izvodi putem prepoznavanja trenutno važećeg stanja i preklapanja na odgovarajuću upravljačku strukturu. Druga mogućnost je tretiranje neanticipiranih (nepredviđenih, unaprijed nemodeliranih) promjena kao nepoznatih poremećaja, koje je potrebno kompenzirati putem metodologije adaptivnog upravljanja – promjenom odgovarajućih parametara u upravljačkom algoritmu, često nakon prethodne automatizirane identifikacije novog matematičkog modela upravljanog sustava. Reakcija na promjenu je ovdje sporija nego kod metoda sa preklapanjem. Treći pristup odnosi se na rekonfiguriranje upravljanja pod kontrolom viših razina upravljanja, gdje se metodologija umjetne inteligencije koristi za odlučivanje o odgovoru na pojavu promjene. Taj odgovor može sadržavati reaktivne elemente – izravna, brza reakcija na zapaženu promjenu – i planske elemente – manja ili veća promjena plana upravljanja (misije upravljanog sustava) temeljena na ocjeni zapažene promjene.

Tri osnovna problema rekonfigurabilnog upravljanja jesu rekonfiguriranje senzora, regulatora i aktuatora. *Rekonfiguriranje senzorske konfiguracije* rješava se u principu intervencijom u blok za obradu senzorske informacije [5]. Potreba za rekonfiguriranjem nastaje zbog djelimičnog ili potpunog kvara senzora, ili zbog promjene radnog režima upravljanog sustava. Kako bi rekonfiguriranje bilo moguće, nužna je redundancija, s time što se pored hardverske redundancije (kada dva ili više senzora mjere istu veličinu) koristi i analitička redundancija (poznavanje matematičkog modela upravljanog sustava omogućava estimaciju njegovog mogućeg ponašanja). Nepouzdana ili za tekuće radno područje neprikladni senzori mogu se jednostavno isključiti iz proračuna, ili im se mogu mijenjati težinski koeficijenti s kojima ulaze u njegov.

Slično tome, *rekonfiguriranje aktuatorске konfiguracije* obavlja se intervencijom u blok za alokaciju upravljanja [4]. Potreba za rekonfiguriranjem nastaje zbog kvara aktuatora, ili pri prijelazu u novi radni režim. Redundancija aktuatora – postojanje većeg broja aktuatora od broja međusobno nezavisnih upravljanih veličina – nužna je za rekonfigurabilno upravljanje. Zbog redundancije raspodjela upravljačkih signala po aktuatorima nema jedinstveno rješenje, pa ju je potrebno odrediti putem neke od metoda optimizacije. Rekonfiguriranje upravljanja svodi se na re-optimizaciju alokacije aktuatora, pri čemu se neželjeni ili neupotrebivi aktuatori mogu isključiti iz računa, ili putem težinskih koeficijenata smanjiti njihov doprinos.

Problem *rekonfiguriranja regulatora* [6, 7] – promjena strukture ili parametara regulatora u svrhu prilagodbe na veliku promjenu – leži vrlo blizu problematike kojom se bavi metodologija *adaptivnog upravljanja*. Adaptivno upravljanje više se bavi promjenom

parametara regulatora, dok rekonfigurabilno upravljanje češće razmatra strukturne adaptacije regulatora putem preklapanja, no osnovna razlika između dva područja jest prije u problemu nego u metodi. Rekonfigurabilno upravljanje uglavnom se povezuje sa kompenzacijom utjecaja otkaza ili vrlo velikim i naglim promjenama, dok je osnovni zadatak adaptivnog upravljanja kompenzacija manjih promjena modeliranih kao vanjski poremećaji.

Mada se ne koristi isključivo za kompenzaciju kvarova, rekonfigurabilno upravljanje često se promatra u sklopu teorije *na kvar tolerantnih sustava upravljanja* [2], gdje predstavlja najnoviji i najmoćniji od tri postojeća pristupa za borbu protiv neželjenih utjecaja kvarova na kvalitetu upravljanja (akomodacija kvarova). Drugi od tri pristupa, *redundantno upravljanje*, nakon pojave kvara umjesto neispravne hardverske komponente sustava automatskog upravljanja (senzor, aktuator, regulator) koristi istu takvu ispravnu, koja je unaprijed pripremljena kao rezerva. Treći pristup, *robustno upravljanje*, ostvaruje pasivan način akomodacije kvara: kod njega se nakon pojave kvara ništa u sustavu upravljanja ne mijenja, ali je on projektiran tako da bude čim je moguće više neosjetljiv na kvarove. Kvalitetni noviji sustavi upravljanja otporni na kvarove koriste kombinaciju sva tri pristupa.

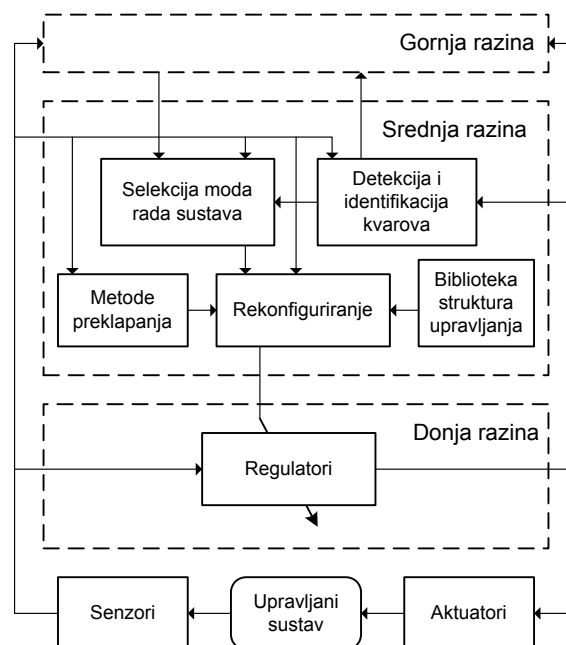


Fig. 2 Reconfigurable control as a part of hierarchical intelligent control architecture

Slika 2. Rekonfigurabilno upravljanje u sklopu hijerarhijske inteligentne arhitekture upravljanja

### 3. Arhitekture rekonfigurabilnih sustava upravljanja

Rekonfigurabilno upravljanje je jedna od više sastavnica *inteligentne arhitekture upravljanja*, kako se često naziva složene, napredne strukture upravljanja potrebne za najsloženije i najzahtjevnije upravljačke zadatke (slika 2). Ovakva struktura sastoji se od tri teoretski prepoznate hijerarhijske razine, a funkcija rekonfigurabilnog upravljanja leži na srednjoj od njih. Na donjoj razini nalaze se osnovni mehanizmi upravljanja i obrade signala zasnovani na numeričkim algoritmima, dok gornja razina nadzire rad cjelokupnog upravljačkog sustava i uz potporu ljudskih operatera odlučuje o koracima koje valja poduzeti u skladu sa trenutnim stanjem sustava i zadanim planom [1].

Potreba za rekonfiguriranjem upravljačke arhitekture prepoznaje se putem praćenja rada upravljanog sustava, odvijanja njegovog zadatka (misije) i stanja okoline. Odluku o rekonfiguriranju upravljanja donosi ili gornja hijerarhijska razina upravljanja (bilo umjetna inteligencija ili ljudski operater), ili reflektivni blok za detekciju i identifikaciju kritičnih

promjena (kvarova) smješten na srednjoj hijerarhijskoj razini. Refleksivni blok potreban je za brzu reakciju gdje je ona potrebna, zato što je reakcija gornje hijerarhijske razine razmjerno spora. U oba slučaja, odluka se u vidu zahtjeva za rekonfiguriranje prenosi selektoru moda rada sustava. Selektor moda rada prima zahtjeve za rekonfiguriranje, donosi konačnu odluku o trenutku, vrsti i načinu rekonfiguriranja, te pokreće proces rekonfiguriranja. Blok za rekonfiguriranje sustava vodi akciju rekonfiguriranja, pri čemu koristi biblioteke pripremljenih regulacijskih struktura i njihovih parametara, algoritme za automatiziranu sintezu i podešavanje parametara regulatora, te neke pomoćne funkcije (npr. metode za potiskivanje tranzijenata pri preklapanju). Rekonfiguriranje se općenito vrši preklapanjem i/ili podešavanjem senzora, aktuatora, regulatora, filtera za obradu signala, metoda nadzora sustava, i drugih sastavnica sustava upravljanja na sve tri hijerarhijske razine.

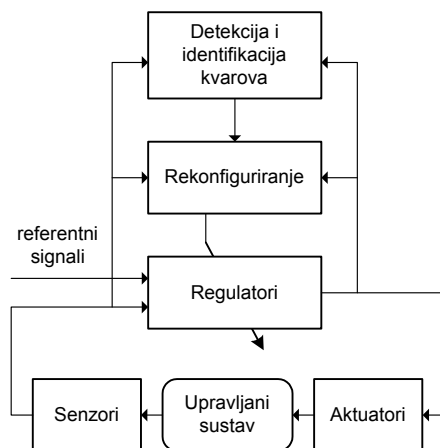


Fig. 3 Basic reconfig. control architecture

SI. 3 Osnovna arhit. rekonfig. upravljanja

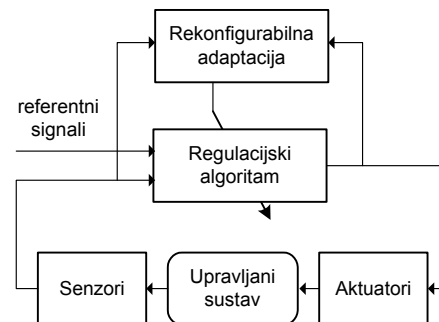


Fig. 4 Compact reconfig. control architecture

SI. 4 Kompaktna arhit. rekonfig. upravljanja

Hijerarhijska inteligentna arhitektura upravljanja daje okvir za sve suvisle moguće akcije rekonfiguriranja. Za istraživanje i realizaciju nekog specifičnog slučaja češće se, međutim, koristiti jednostavnija upravljačka arhitektura bez najviše hijerarhijske razine (slika 3). Akcija rekonfiguriranja je ovdje refleksivne prirode, i obično se provodi u svrhu prilagodbe sustava automatskog upravljanja na pojavu nekog specifičnog kvara (akomodacija kvara). Modul za detekciju i identifikaciju kvara ujedno obavlja ulogu selektora moda rada sustava, pa je time hijerarhijski nadređen modulu za rekonfiguriranje. Moguće je i da modul za detekciju i identifikaciju promjene (kvara) bude integriran sa modulom za rekonfiguriranje u jedinstvenu cjelinu (slika 4). Identifikacija promjene tada ne postoji kao zaseban korak, već jedinstveni blok rekonfigurabilnog upravljanja (adaptacije) prati greške upravljanja i druge karakteristične signale sustava i na temelju njih provodi adaptaciju upravljačkog algoritma.

#### 4. Karakteristične realizacije rekonfigurabilnog upravljanja

*Upravljanje sa više paralelnih modela i regulatora* (slika 5) često se susteće kao pristup za rekonfigurabilno preklapanje regulatora [6]. Upravljački sustav se sastoji od više nezavisnih upravljačkih kanala, od kojih je svaki unaprijed pripremljen za neko karakteristično, anticipirano radno područje (najčešće su to različiti modovi kvara sustava). U  $i$ -tom kanalu se nalazi estimator (Kalmanov filter) koji nalazi estimaciju  $\hat{x}_i$  stanja upravljanog sustava  $x$  koristeći izmjerene signale  $y$  i pripadni matematički model sustava, te regulator koji iz usporedbe estimiranog stanja  $\hat{x}_i$  i željenog stanja  $x_d$  nalazi upravljačke signale  $u_i$ . I regulator i estimator podešeni su tako da odgovaraju radnom području  $i$ -tog upravljačkog kanala. Parametar  $w_i$  je mjera statističkog poklapanja estimacije  $\hat{x}_i$  sa stvarnim ponašanjem

sustava – numerička ocjena koliko je stvarni sustav u promatranom vremenskom intervalu blizu  $i$ -tom radnom području – i njega se koristi kao težinu pri težinskoj sumaciji doprinosa pojedinih upravljačkih kanala  $\mathbf{u}_i$  u jedinstveni upravljački signal  $\mathbf{u}$ . Paralelni rad većeg broja upravljačkih kanala omogućava prilagodbu i na anticipirana i na prijelazna radna područja, ali računski jako opterećuje upravljački sustav. Stoga se u praktičnim realizacijama teži tome da se neaktivni kanali drže isključenima sve dok rad onih aktivnih zadovoljava.

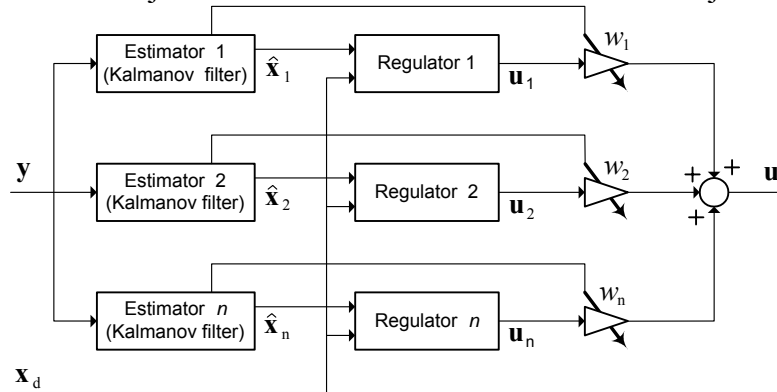


Fig. 5 Multiple model estimation and control

Slika 5. Upravljanje sa više paralelnih modela i regulatora

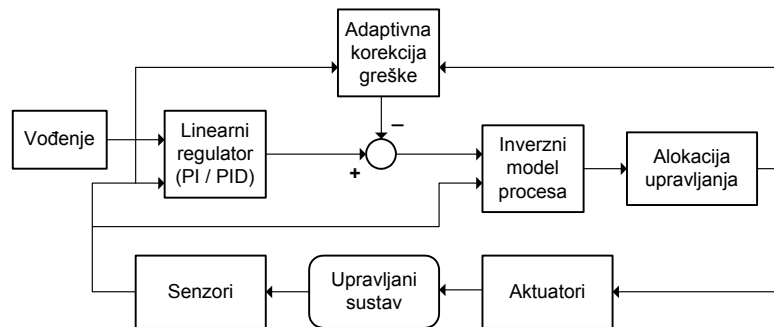


Fig. 6 Direct neural adaptive control

Slika 6 Direktno neuronsko adaptivno upravljanje

Metoda *izravnog neuronskog adaptivnog upravljanja* (slika 6) pokazala se kao kvalitetno rješenje za brzu kompenzaciju poremećaja i kvarova [7]. Njezina velika prednost je nepostojanje odvojenog koraka identifikacije promjene, čime se značajno pojednostavnjuje praktična realizacija sustava i ubrzava reakcija na promjene, ali joj je primjena ograničena na razmjerno usku klasu problema upravljanja. Metoda koristi princip linearizacije procesa putem povratne veze: inverzni model procesa, smješten iza regulatora, poništava nelinearnosti u procesu i time omogućava upotrebu jednostavnog linearnog regulatora. Adaptacija regulacijske strukture na promjene obavlja se pomoću adaptivnog modula za korekciju greške, koji ispravlja greške inverznog modela putem aditivne korekcije. I inverzni model procesa i modul za korekciju greške izvedeni su kao neuronske mreže.

Najjednostavnija metoda alokacije upravljačkih signala izvodi se po principu *pseudoinverzije upravljačke matrice* [4, 2]. Kod ove metode pretpostavlja se da se utjecaj aktuatora na upravljeni sustav može opisati linearnom jednačbom  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}$ , gdje je  $\boldsymbol{\tau}$  vektor ukupnog djelovanja upravljačkog sustava na upravljeni sustav,  $\boldsymbol{\delta}$  vektor doprinosa pojedinih aktuatora (dimenzija  $\boldsymbol{\delta}$  veća je od dimenzije  $\boldsymbol{\tau}$ ), a  $\mathbf{B}$  upravljačka matrica. Željeni doprinos pojedinih aktuatora  $\boldsymbol{\delta}_d$  nalazi se iz željenog ukupnog upravljačkog djelovanja  $\boldsymbol{\tau}_d$  prema jednostavnoj formuli  $\boldsymbol{\delta}_d = \mathbf{B}_W^\dagger \boldsymbol{\tau}_d$ , gdje je  $\mathbf{B}_W^\dagger$  *poopćeni pseudoinverz* matrice  $\mathbf{B}$ , izračunat

tako da minimizira kvadratični kriterij  $J = 0,5 \delta_d^T \mathbf{W} \delta_d$  (upotrebu upravljačke energije) uz težinsku matricu  $\mathbf{W}$  [8]. Rekonfiguriranje alokacije upravljanja vrši se jednostavno upotrebom pseudoinverza izračunatog za novu vrijednost  $\mathbf{B}$  (što odražava promjene u upravljanoj sustavu) i/ili  $\mathbf{W}$  (što odražava promjene u cijeni upotrebe pojedinih aktuatora). Metoda pseudoinverzije je računski jednostavna, ali ne daje najbolja optimalna rješenja, niti vodi računa o zasićenju aktuatora. Složenije metode optimizacije alokacije upravljanja jesu, međutim, u principu računski vrlo zahtjevne i često neprikladne za praktičnu realizaciju (osim putem unaprijed pripremljenih odgovora za karakteristične anticipirane modove rada sustava).

## 5. Rekonfigurabilno upravljanje kod bespilotnih ronilica

Sa dinamičkog stanovišta, dvije osnovne vrste malih ronilica bez posade jesu krstareće i lebdeće ronilice [9]. Krstareće ronilice (slika 7) koriste se za mjerenje, kartiranje i prikupljanje podataka, te za potragu. One djeluju nad širokim prostorom sa razmjerno malo zapreka, imaju hidrodinamičan oblik trupa, i pri normalnom radu se neprekidno gibaju prema naprijed. Za upravljanje svojim gibanjem obično koriste glavne pogonske propulzore, te upravljačka kormila i krilca, koja su djelotvornija od manevarskih propulzora kada vozilo napreduje osjetnom brzinom, ali sasvim neupotrebljiva kada ono stoji. Problem upravljanja gibanjem ronilice dijeli se u četiri upravljačka kanala: brzina napredovanja, kormilarenje, zaranjanje i valjanje. Lebdeće ronilice (slika 8) pak obavljaju zadatke podvodne inspekcije, intervencije (rad sa manipulatorima) i nadzora nad radom drugih sustava. One mogu lebdjeti u mjestu, gibati se unatrag, postrance i gore-dolje, ali zato ne trebaju brzinu i domet krstarećih ronilica. Za manevriranje koriste manevarske propulzore, imaju veći broj stupnjeva slobode gibanja i traže veću preciznost upravljanja. Problem upravljanja ne može se podijeliti u upravljačke kanale, osim za razmjerno jednostavne slučajeve, no zato se mogu zanemariti neki hidrodinamički efekti koji dolaze do izražaja pri većim brzinama. Poseban izazov predstavljaju krstareće ronilice sa mogućnosti lebdenja: zadatak ovih vozila je da dođu do nekog udaljenog cilja čija lokacija može biti nepoznata i na njemu obave neki jednostavniji zadatak. One su po svojim karakteristikama i izgledu između dvije osnovne klase, te imaju i manevarske propulzore i upravljačka krilca. Pri upravljanju takvim vozilima postoje jasno odvojeni režim krstarenja i režim lebdenja.

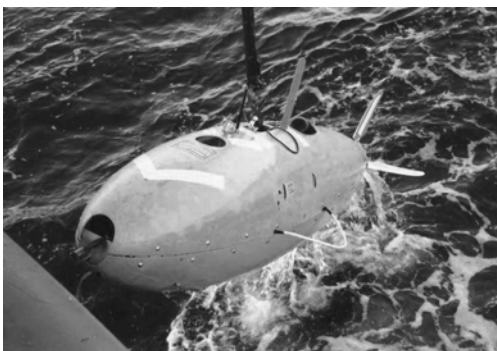


Fig. 7 Cruising unmanned underwater vehicle

Slika 7. Krstareća ronilica

Odyssey (MIT, USA)

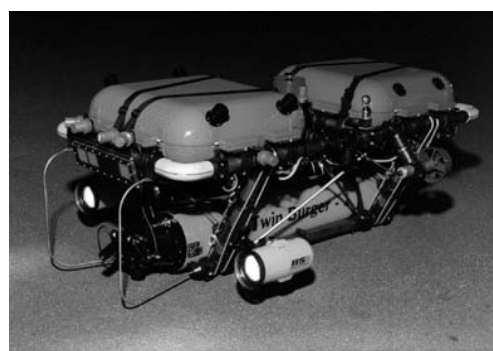


Fig 8. Hovering unmanned underwater vehicle

Slika 8 Lebdeća ronilica

Twin Burger (University of Tokyo, Japan)

Rekonfigurabilno upravljanje je potrebno pri upravljanju bespilotnim ronilicama. Mada pojava kvara kod njih ne vodi u opasnost od trenutnog uništenja vozila (kao kod letjelica), vozilo nakon kvara može svejedno biti izgubljeno. Povrh toga, potraga za onespособljenom ronilicom obično je neizvjesna, njezino spašavanje mukotržno, a prekid u obavljanju zadatka zbog kvara razmjerno dugotrajan i skup. Rekonfigurabilna prilagodba upravljačkog sustava na

različite hardverske konfiguracije, stanja okoline i tipove misija je također od izrazite koristi. Ronilice su modularne građe i njihova priprema za novu misiju se vrši na terenu uz moguća snažna ograničenja u vremenu, opremi i dostupnosti stručnjaka. Potreba za optimizacijom upravljanja, na primjer u svrhu štednje energije, može biti vrlo velika.

Lebdeće ronilice imaju u principu više redundantnih aktuatora od krstarećih, i metode sa rekonfiguriranjem alokacije upravljanja vrlo su zanimljive za njih. Pomoću rekonfigurabilnog upravljanja lebdeća ronilica često može nastaviti rad nakon gubitka jednog propulzora, uz donekle smanjenu kvalitetu upravljanja [4]. Kod krstarećih ronilica veća je važnost metoda sa rekonfiguriranjem ili adaptacijom regulatora, poput upravljanja sa više paralelnih regulatora ili direktnog neuronskog adaptivnog upravljanja.

Za obje klase ronilica su pored toga vrlo zanimljive metode sa rekonfiguriranjem senzora. Rekonfigurabilno upravljanje omogućava finu optimizaciju fuzije senzorske informacije, te djelimičnu ili potpunu eliminaciju nepouzdanih senzora [5]. Pored akomodacije kvarova, važno je pitanje izbora senzora za pojedina radna područja. Sensori koji mjere položaj vozila sa manjom apsolutnom greškom često traže više dragocjene energije, ili su osjetljiviji na šum i rade s duljim periodom diskretizacije, ili mogu raditi samo blizu morskog dna ili na površini. Optimalna konfiguracija navigacijskih senzora se zbog toga razlikuje za slučaj krstarenja u odnosu na slučaj preciznog manevriranja, te za različite dubine ronjenja ronilice.

## 6. Zaključak

Rekonfigurabilno upravljanje još se uglavnom povezuje sa eksperimentalnim ili najzahtjevnijim aplikacijama. Njegova uloga i rasprostranjenost značajno će se, međutim, povećati u bliskoj budućnosti sa pojavom sve složenijih sustava automatskog upravljanja i sve većim zahtjevima na kvalitetu, sigurnost, djelotvornost i autonomiju upravljanja. U pomorskom svijetu susreće ga se uz bespilotne ronilice, ali i kod naprednih integriranih sustava upravljanja brodom i brodskim sustavima. Svrha, namjena i mogućnosti rekonfigurabilnog upravljanja predstavljeni su u ovom članku, uz prikaz različitih arhitektura za rekonfigurabilno upravljanje i metoda njegove izvedbe.

## LITERATURA

- [1] V. Bakarić, Z. Vukić, R. Antonić: "Scope and application of reconfigurable control", *Proc. 11<sup>th</sup> Mediterrenaeen Conference on Control and Automation MED'03*, Rhodes, Greece, June 2003, CD-ROM
- [2] Y. Huo, P. A. Ioannou, M. Mirmirani, *Fault-tolerant control and reconfiguration for high performance aircraft: review*, CATT Technical Report No. 01-11-01, Univ. of Southern California, Los Angeles, USA, 2001/02 (vidi [http://www.usc.edu/dept/ee/catt/2002/ying/web\\_AIR/](http://www.usc.edu/dept/ee/catt/2002/ying/web_AIR/))
- [3] L. Wills, S. Kannan, S. Sander, M. Guler, B. Heck, J. V. R. Prasad, D. Schrage, G. Vachtsevanos, "An open platform for reconfigurable control," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 21, no. 6, pp. 49-64, June 2001
- [4] E. Omerdić, G. N. Roberts: "Thruster fault accomodation for underwater vehicles", *Proc. 1<sup>st</sup> IFAC Workshop on Guidance and Control of Underwater Vehicles*, Newport, UK, Apr. 2003, pp. 221-226
- [5] L. Drolet, F. Michaud, J. Côté: "An adaptable navigation system for an underwater ROV", *Proc. PRECARN-IRIS International Symp. on Robotics (ISR)*, Montréal, Canada, 2000, pp. 244-245. (vidi <http://www.gel.usherb.ca/laborius/>)
- [6] L. Ni, *Fault-tolerant control of unmanned underwater vehicles*, Ph. D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2001
- [7] A. J. Calise, S. Lee, M. Sharma, "Development of a reconfigurable flight control law for the X-36 tailless fighter aircraft," *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Denver, CO, USA, Aug. 2000
- [8] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Chichester, UK: J. Wiley & Sons, 1994
- [9] Z. Vukić, V. Bakarić, S. Mandžuka: "Stanje i perspektive razvoja bespilotnih ronilica", *Brodogradnja*, god. 50, br. 2 (lipanj 2002), str. 229-241