

HIL simulacija samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda

Mr Milorad Milovanović, dipl.inž.¹⁾
 Mr Miroslav Radosavljević, dipl.inž.²⁾

Prikazan je metod za samonavođenje akustičkog torpeda na brazdu broda uz pretpostavku postojanja matematičkog modela i softverske off-line simulacije u horizontalnoj ravni. Za takvo samonavođenje razvijena je softversko - hardverska simulacija (Hardware in the loop - HIL ili HITL). Dinamika i kinematika torpeda simuliraju se softverski, a elektronika uređaja samonavođenja (USN), brzinski žiroskop i ostale komponente sistema mogu se uključivati opciono: kao softverski moduli ili kao hardverske realizacije. Prikazani su rezultati simulacije.

Ključne reči: Torpedo, samonavođenje, HIL simulacija, matematički model.

Korišćene oznake i simboli

l	– rastojanje između torpeda i cilja,
Ox	– uzdužna osa torpeda,
Ox_t	– željena uzdužna osa torpeda,
Ox_0y_0	– pravougaoni koordinatni sistem vezan za zemlju,
V	– brzina torpeda,
V_c	– brzina cilja,
ψ_c	– ugao azimuta cilja,
(x'_0, y'_0)	– početne koordinate torpeda,
(x_0, y_0)	– početne kordinate cilja,
Ψ_z	– ugao torpeda u datom momentu meren od ose Ox_0
η_{tor}	– teoretski ugao definisan između osa x_t i x_z ,
ψ_0	– ugao koji zaklapa torpedo sa Ox_0 osom u momentu prvog preseka brazde broda,
$\dot{\eta}$	– ugaona brzina koju meri brzinski žiroskop,
δ	– ugao otklona smernih kormila,
δ_{max}	– maksimalni otklon smernih kormila u desno,
δ_{max}	– maksimalni otklon smernih kormila u levo,
CL_0	– cilj se nalazi levo u odnosu na smer kretanja torpeda u momentu prvog presecanja brazde broda,
CD_0	– cilj se nalazi desno u odnosu na smer kretanja torpeda u momentu prvog presecanja brazde broda,
USN	– uređaj za samonavođenje,
r	– poluprečnik zaokreta torpeda.

Uvod

TORPEDO, kao tipično podvodno borbeno sredstvo, pojavilo se 1863. godine. Prvi put je uvedeno u naoružanje austrougarske ratne mornarice 1868. godine. Prvi brod potopljen torpedom bio je turski brod *INTIVAN* u tursko-ruskom ratu 1877-1878. godine. Od tada, pa do današnjih dana, torpedo je postalo najefikasnije oružje za borbu protiv podmornica i brodova.

Najčešće primenjivani metodi samonavođenja torpeda su: metod čiste potere, metod paralelnog približavanja i metod samonavođenja sa konstantnim uglom preticanja. Svi ovi metodi zahtevaju stalnu informaciju o relativnom položaju cilja (broda) u odnosu na torpedo. Ovi metodi koriste se i u raketnoj tehnici [1,2]. Brazda, koju brod stvara krećući se kroz vodu, omogućava samonavođenje torpeda i bez informacija o relativnom odnosu cilja u odnosu na torpedo. Ovakva vrsta samonavođenja ima značajnu prednost (pri istim ostalim uslovima) koja se, pre svega, ogleda u smanjenju mogućnosti ranog otkrivanja i povećanju efikasnosti dejstva. Danas u svetu postoji mnogo torpeda koja koriste metod samonavođenja na brazdu broda.

Proces samonavođenja torpeda na cilj obuhvata rešavanje niza zadataka, kao što su: dobijanje informacija o kretanju cilja i ponašanju torpeda, obradu primljenih informacija radi određivanja korekcije vođenja, formiranje signala vođenja radi otklanjanja komandnih organa torpeda pri čemu se stvaraju neophodne upravljajuće hidrodinamičke sile. Ambijent u kome se kreće torpedo specifičan je, a karakterišu ga mnogi faktori: gustina vode, slanost, prozračnost, temperatura i sl. Ove specifičnosti su ograničenja prostiranja akustičkih i elektromagnetskih talasa, o čemu se mora voditi računa pri projektovanju uređaja za samonavođenje.

Metod samonavođenja torpeda na brazdu broda veoma je složen. U cilju analize ovog metoda, bilo je neophodno detaljno proučiti kretanje (praćenjem brazde broda) akustičkog torpeda ka cilju. Iz činjenice da su realni eksperimenti veoma skupi, proizlazi potreba za adekvatnom simulacijom procesa samonavođenja i sistema za upravljanje. Projektovanje sistema za samonavođenje i upravljanje i podešavanje njegovih parametara vrši se primenom adekvatnih simulacija. U ovom radu detaljno će biti analiziran problem samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda, matematičko modelovanje i HIL simulacija samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda.

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

²⁾ Vojnotehnička akademija, VJ, 11000 Beograd, Ratka Resanovića 1

Izuzimajući metod samonavođenja na trag broda, svi ostali metodi potpuno su teorijski obrađeni. Za metod samonavođenja na trag broda ne postoji adekvatna teorija u dostupnoj literaturi. Ovaj rad, pored ostalog, ima za cilj teorijsko uobličavanje metoda samonavođenja na trag broda u formi pogodnoj za matematičko modelovanje i simulaciju.

Postavka problema

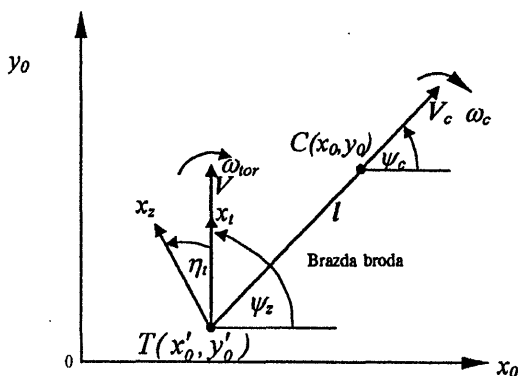
Samonavođenje torpeda na brazdu broda specifičan je oblik vođenja torpeda. Primenjujući navedeni metod, neophodno je da torpedo poseduje brzinu veću od brzine broda, te da se, stalnim presecanjem brazde broda, zaokreće u stranu cilja u nameri da ga sustigne. Sustizanje cilja podrazumeva prolazak torpeda na udaljenosti na kojoj se izaziva reakcija nekontaktnog upaljača i detonacija bojeve glave. Uređaj za samonavođenje torpeda, putem hidrofona, obezbeđuje stalne informacije o trenutnom položaju torpeda u odnosu na trag broda. Na osnovu programa za samonavođenje, USN formira signale upravljanja koje šalje na kormila, čime se realizuje samonavođenje. Sistem za samonavođenje sačinjavaju: torpedo (na koje deluje ambijent u kojem se kreće), uređaj za samonavođenje i kormila.

Zahtev za preciznošću metoda samonavođenja torpeda na brazdu broda podrazumeva određenu složenost sistema. Pored preciznih informacija o zahvatu brazde broda, zahteva se i dobro poznavanje dinamičkih svojstava torpeda, kao objekta upravljanja i izbor dovoljno robusnih upravljačkih sistema u uslovima manevra cilja i spoljnih poremećaja koji nastaju neposredno nakon lansiranja sa površinskih i podvodnih torpednih nosača i u toku kretanja torpeda.

Zahtev za autonomnošću procesa samonavođenja podrazumeva određivanje položaja torpeda u odnosu na brazdu broda i pouzdani upravljački algoritam u cilju formiranja odgovarajućih izvršnih signala.

Samonavođenje akustičkog torpeda na brazdu broda

Usvojena je pretpostavka da su poznati: putanja broda - cilja, brzina torpeda i program za samonavođenje. Samonavođenje torpeda ostvaruje se periodičnim presecanjem traga broda. U cilju sustizanja broda - cilja, pri minimalnim neophodnim manevrima torpeda, neophodno je obezbediti optimalni ugao preseka brazde [3,4]. Brže postizanje i stabilizacija optimalnog ugla ulaza i izlaza iz brazde broda postiže se uvećanjem poluprečnika zaokreta torpeda. Ilustracija metode za samonavođenje torpeda na brazdu broda prikazana je na slici 1.



Slika 1. Ilustracija međusobnog položaja torpeda i cilja kod metoda samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda u horizontalnoj ravni

Neka se cilj kreće brzinom V_c i manevriše ugaonom brzinom ω_c . U nekom, proizvoljno odabranom, vremenskom

trenutku t_0 torpedo se nalazi u tački $T(x'_0, y'_0)$, a cilj u tački $C(x_0, y_0)$, na udaljenosti ℓ . Torpedo se kreće brzinom V i zaokreće ugaonom brzinom ω_{tor} presecajući trag broda (na sl.1, to je duž $\ell = TC$).

Brzina torpeda na putanji je konstantna, pa se upravljanje zaokretanjem vrši po delovima kružnice sa poluprečnikom r_n . Poluprečnik mora zadovoljiti uslov:

$$r_n = g_n \cdot r, \quad g_n \geq 1 \quad (1)$$

Tipične vrednosti parametra g_n su: 1; 1,5; 2 i 2,5. Očigledno je da kružnici $g_n = \infty$ odgovara pravolinijsko kretanje $\omega_{tor} = 0$.

Cilj je formiranje blok-šeme sistema za samonavođenje torpeda na brazdu broda u horizontalnoj ravni. Zato je neophodno detaljnije sagledati kinematičke odnose predstavljene na slikama 1, 2 i 3 [4]. Osa $0x_0$ je referentna, osa $0x_{z0}$ je uzdužnica torpeda u prostoru u momentu prvog nailaska na brazdu broda, a njen položaj definisan je uglom Ψ_0 u odnosu na osu $0x_0$. Kad torpedo naiđe na ivicu brazde broda, započinje proces samonavođenja ($t=0$ start samonavođenja). Osa $0x_z$ je uzdužnica torpeda. Ugaona brzina zaokretanja ove ose je ω_{tor} , a meri se brzinskim žiroskopom. Trenutni položaj ose $0x_z$, u prostoru, definisan je uglom Ψ_z , a računa se po formuli:

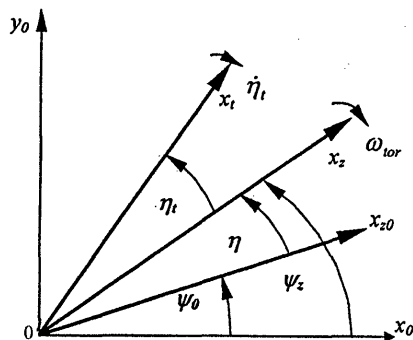
$$\Psi_z = \Psi_0 + \eta \quad (2)$$

η je ugao zaokretanja torpeda van brazde i u brazdi broda, a meri se od trenutka kada torpedo prvi put napusti brazdu broda. Dobija se rekursivnom formulom:

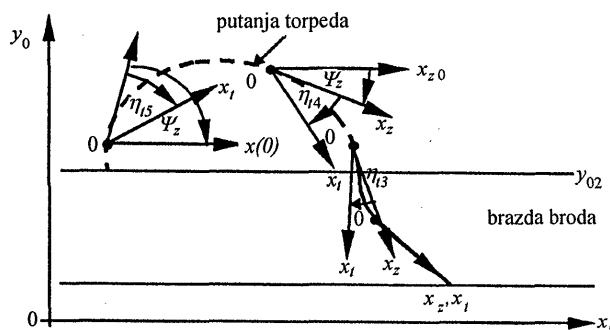
$$\eta(t + \Delta t) = \eta(t) + \int_t^{t+\Delta t} \dot{\eta} dt \quad (3)$$

$\dot{\eta}$ — ugao brzina zaokretanja torpeda koju meri brzinski žiroskop

Δt — interval integracije



Slika 2. Kinematički odnosi kod metoda samonavođenja torpeda na brazdu broda u horizontalnoj ravni



Slika 3. Međusobni odnosi osa x_{z0} , x_z i x_t pri metodu samonavođenja torpeda na brazdu broda na karakterističnim delovima trajektorije

Osa Ox_1 predstavlja naredni željeni položaj ose Ox_2 . Osa Ox_1 zakreće se ugaonom brzinom $\dot{\eta}_1$, a njen položaj, u odnosu na osu Ox_2 , dat je uglom η_1 koji se računa po formuli:

$$\eta_1(t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} \dot{\eta}_1 dt \quad (4)$$

Na delovima trajektorije torpeda, gde je konstantan ugao η_1 , konstantna je i ugaona brzina ω_{tor} kojom se zaokreće Ox_2 osa torpeda. Ukoliko je ispunjen uslov da je brzina torpeda konstantna na celoj svojoj trajektoriji, onda će se osa Ox_2 u horizontalnoj ravni, kretati po delovima kružnice sa tačno određenim poluprečnikom definisanim relacijom (1). Ukoliko je poluprečnik r_n zaokreta torpeda veći, ugaona brzina ω_{tor} je manja. Minimalni poluprečnik zaokreta definisan je manevarskim sposobnostima torpeda $r = r_{min}$. Posledica minimalnog poluprečnika zaokretanja torpeda je postizanje konačne uglovne brzine zaokreta koja se definiše kao maksimalna $\omega_{tor} = \omega_{max}$. U odnosu na maksimalnu ugaonu brzinu zaokreta, definišu se ostali parametri torpeda a među njima i željena ugaona brzina zaokretanja $\dot{\eta}_1$.

U slučaju da, pri zaokretanju torpeda, postoji pet različitih ugaonih brzina, bira se $\dot{\eta}_{15} = \omega_{max}$, a tada je poluprečnik zaokreta $r = r_{min}$. Bira se i $\dot{\eta}_{11} = \omega_{min}$, pri čemu je poluprečnik zaokreta $r = r_{min}$. Ostale tri ugaone brzine ($\dot{\eta}_{14}, \dot{\eta}_{13}, \dot{\eta}_{12}$) zaokreta nalaze se u dijapazonu od ω_{max} do ω_{min} a, shodno tome, i odgovarajući poluprečnici zaokreta. Ugao η_1 može biti pozitivne i negativne orijentacije, što zavisi od položaja cilja u odnosu na brazdu broda.

Na osnovu slika 1, 2 i 3, i analize međusobnih odnosa osa, može se doći do jednačine za kretanje cilja i torpeda:

$$\begin{aligned} \dot{y}_c &= V_c \sin \Psi_c, \quad \dot{x}_c = V_c \cos \Psi_c, \quad \dot{x} = V \cos \Psi_z, \\ \dot{y} &= V \sin \Psi_z \end{aligned} \quad (5)$$

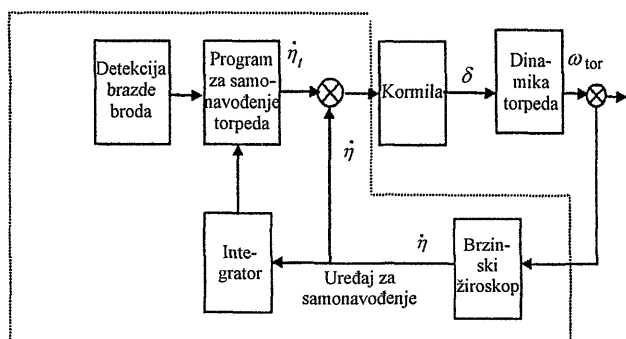
i jednačine metoda samonavođenja torpeda na brazdu broda:

$$\omega_{tor} = \pm k_n \omega_{max} \quad n = 0, 1, 2, \dots, 0 < k_n < 1 \quad (6)$$

$\pm k_n$ — bezdimenzionalni koeficijent, „+” se uzima za zaokretanje torpeda u desno a „-” u levo;

ω_{max} — maksimalna ugaona brzina kojom torpedo može da se zaokreće $0 \leq \omega_1 \leq \omega_{max}$ $\omega_{max} = 14 [^\circ/s]$

Na osnovu sprovedene analize kinematičkih odnosa datih jednačinama kretanja cilja i torpeda i implementiranog programa za samonavođenje, formira se blok-šema sistema za samonavođenje na brazdu broda u horizontalnoj ravni (sl.4).



Slika 4. Blok-šema sistema za samonavođenje akustičnog torpeda na brazdu broda u horizontalnoj ravni

Signal $\dot{\eta}_1$ formira blok programa za samonavođenje na osnovu podataka o detekciji brazde broda i ugla zaokreta torpeda van i u brazdi broda. Ugao zaokreta torpeda dobija se sumiranjem integraljenih trenutnih ugaonih brzina $\dot{\eta}$ (meri ih brzinski žiroskop) zaokretanja torpeda ω_{tor} . Upoređivanjem programa za samonavođenje generisane ugaone brzine $\dot{\eta}_1$ i merene $\dot{\eta}$, dobija se signal greške koji otklanja kormila u odgovarajuću stranu za ugao δ . Otklon kormila je ulazna veličina u dinamiku torpeda čime se generiše ugaona brzina ω_{tor} .

HIL simulacija samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda

U postupku izučavanja sistema za samonavođenje akustičkog torpeda na brazdu broda, posle izvršene analize metode samonavođenja, od posebnog su značaja matematičko modelovanje, softverska i HIL simulacija. U ovom radu, zbog ograničenog obima, softverska simulacija [4,5] nije prikazana. Uobičajeno je da se HIL simulacija primenjuje, kao posebna metoda, za projektovanje, ispitivanje i podešavanje parametara sistema za vođenje i upravljanje letelica uopšte [6,7]. Učinjen je pokušaj da se HIL simulacija primeni i u svrhu verifikacije matematičkog modela samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda, a dobijeni rezultati, prikazani u nastavku rada, dokazali su da je to uspešno urađeno.

Struktura HIL simulacionog modela za samonavođenje akustičkog torpeda na brazdu broda

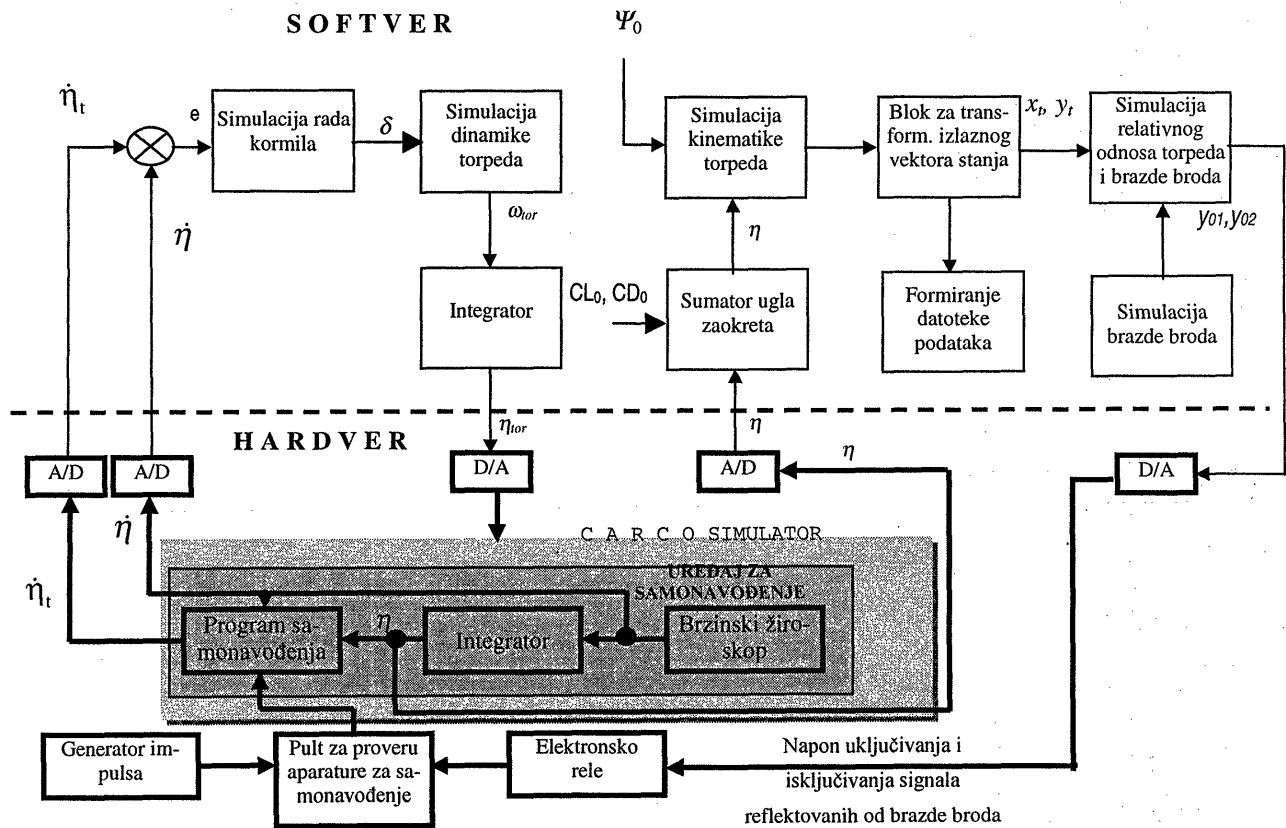
Na sl.5 je predstavljena globalna struktura HIL simulacionog modela samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda. Osnovni delovi navedenog modela su: softver implementiran na personalnom računaru klase PENTIUM PRO, hardver USN, troosni simulator kretanja CARCO S-450R/3, D/A i A/D konvertori.

Rad kormila, dinamika i kinematika torpeda, transformacija izlaznog vektora stanja, brazda broda, memorisanje izlaznog vektora stanja, simulacija detekcije brazde broda i upravljanje hardverskim komponentama softverski se ostvaruju. Kao hardverske realizacije u HIL petlji opciono se uključuju: USN akustičkog torpeda na brazdu broda, troosni simulator kretanja CARCO, aparatura za formiranje reflektovanog signala od brazde broda A/D i D/A konvertori. Biće prikazano, detaljnije, nekoliko najkarakterističnijih modela koji softverski simuliraju pojedine komponente u okviru HIL strukture.

Simulacija izvršnih organa torpeda (kormila)

Kormila, u simulacionom modelu, predstavljaju izvršne organe kojima se generišu ulazne veličine - otkloni kormila, u cilju zaokretanja torpeda. Otklon kormila, za analizirani tip torpeda, modeluje se dvojakom: kao dvopoložajno rele (otklon kormila u krajnje levi ili krajnje desni položaj) i kao tropoložajno rele (otklon kormila su krajnje levi, neutralni i krajnje desni položaj). Na osnovu blok-šeme HIL simulacije samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda modela, ulazna veličina je razlika ugaonih brzina $e = \dot{\eta}_1 - \dot{\eta}$, a izlaz je otklon kormila δ . U proceduri modelovanja kormila su predstavljena nelinearnim elementom:

$$\delta = \begin{cases} \delta_{max}, & e < 0 \\ 0, & e = 0 \\ -\delta_{max}, & e > 0 \end{cases} \quad (7)$$



Slika 5. Blok-šema HIL simulacije samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda

Simulacija dinamike torpeda

Funkcija prenosa $W_r(s)$ dinamike torpeda određena je analitičkim modelovanjem [4]. Na osnovu analize, date u [8], redukcijom modela, funkcija prenosa dinamike torpeda, u horizontalnoj ravni data je izrazom :

$$W_r(s) = \frac{\omega_{tor}(s)}{\delta(s)} = \frac{B_0 s + 1}{B_1 s^2 + B_2 s + B_3} \quad (8)$$

i definiše zaokretanje torpeda ugaonom brzinom $\omega_{tor}(s)$ u odnosu na otklon kormila $\delta(s)$. Na osnovu konkretnih hidrodinamičkih, masenih i inercijalnih karakteristika analiziranog torpeda, u horizontalnoj ravni, data je funkcija prenosa analiziranog torpeda u obliku [4] :

$$W_r(s) = \frac{0,1132s + 1}{0,00152s^2 + 0,4s + 0,7} \quad (9)$$

Analiza simulacionog modela je pokazala da funkcija prenosa, data u (9), zadovoljava uslove stabilnosti i upravljivosti sistema za samonavođenje akustičkog torpeda na brazdu broda, u horizontalnoj ravni, uz pretpostavku potpune stabilizacije valjanja.

Simulacija kinematike torpeda u horizontalnoj ravni

Putanju torpeda, po metodi samonavođenja na brazdu broda, simulacioni model će predstavljati u (x_0, y_0) ravni. Iz jednačina (5) vidljivo je da su osnovni parametri za određivanje x_0 i y_0 koordinate torpeda, u odnosu na brazdu broda, ugao Ψ_2 i brzina kojom se torpedo kreće.

Simulacija relativnog položaja torpeda i brazde broda

Putanja torpeda jednoznačno je prikazana jednačinama (5), a brazda broda jednačinama koje definišu njenu dužinu i širinu, a funkcije su brzine kretanja i dimenzija broda - cilja. Dužina brazde zavisi od brzine broda, a računa se po formuli [4]:

$$D_b = V_c 180 \text{ [m]} \quad (9)$$

Detaljnija analiza brazde broda nije potrebna, jer za ovu simulaciju nije bitan oblik već samo detekcija ivice brazde i boravak ispod ili u brazdi. U simulaciji brazda je prikazana pojednostavljeno sa dve paralelne linije. U opštem slučaju putanja torpeda može se predstaviti nizom uređenih parova koordinata (x_{0i}, y_{0i}) $i = 1, 2, 3, \dots, \infty$, a brazda broda ordinatama $y_{01} = C_1$ i $y_{02} = C_2$ uz pretpostavku da su ivice brazde broda dve paralelne prave sa osom Ox_0 . Presek torpeda i brazde broda dobija se iz uslova:

$$y_{01} = y_{0i} \vee y_{02} = y_{0i} \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

a boravak u brazdi iz uslova :

$$y_{01} < y_{0i} < y_{02}, y_{01} < y_{02} \quad (11)$$

Opis programa TORPEDOH za HIL simulaciju samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda

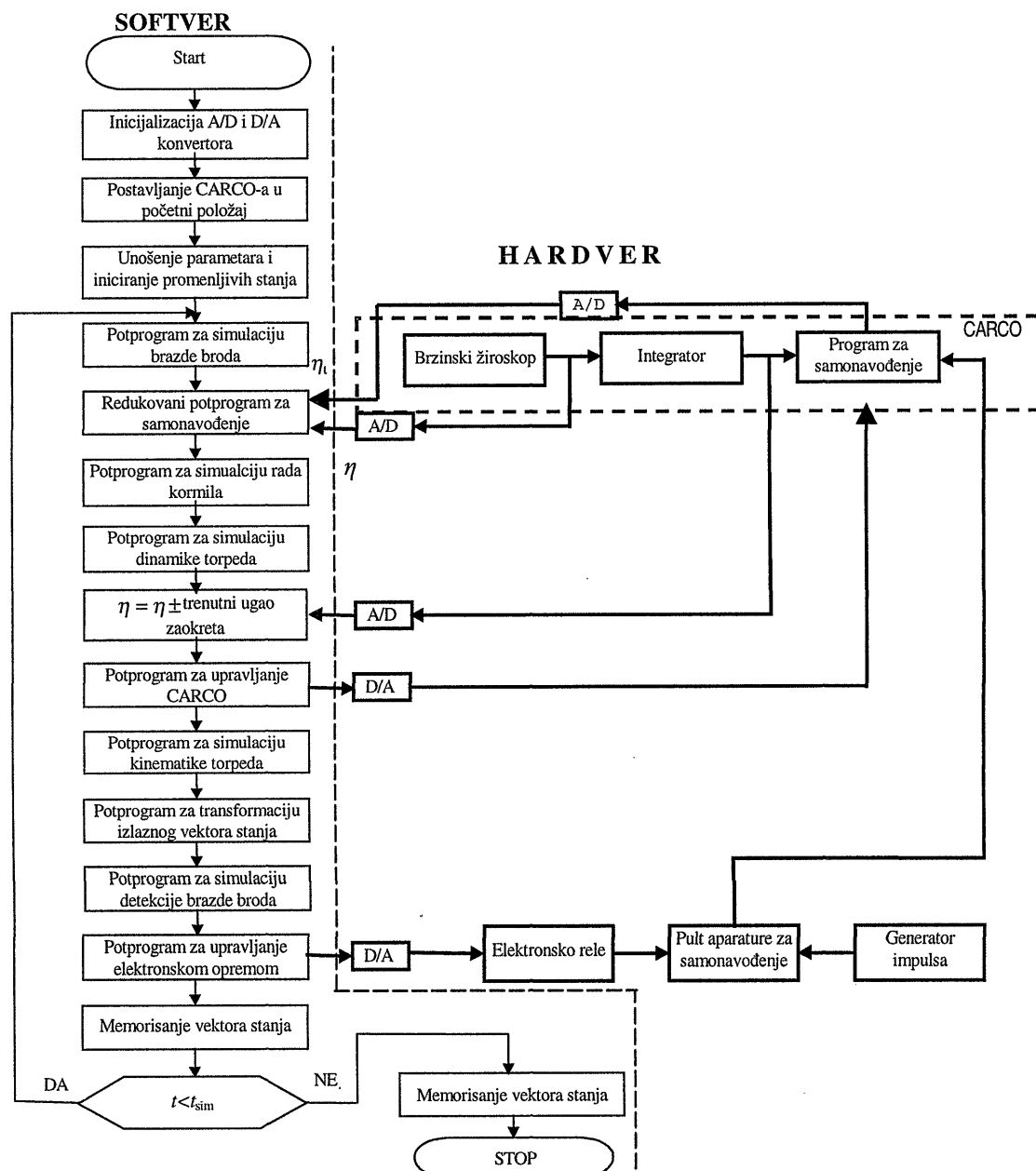
Realizacija prethodno opisanog koncepta HIL simulacije ostvaruje se u realnom vremenu. Program za HIL simulaciju je TORPEDOH i napisan je u MICROSOFT FORTRAN-u 5.1. Potprogrami za upravljanje konvertorima napisani su u MICROSOFT C-u. U ovom slučaju iskorišćena je mogućnost programskog jezika MICROSOFT FORTRAN da rutine, napisane u C-u, direktno poziva.

Najvažnija komponenta HIL simulacione petlje samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda je PC koji se, u modelu, koristi dvojako. U osnovi, softverski se simuliraju pojedine komponente koje nisu hardverski opcionalno uključene u petlju (dinamika i kinematika torpeda, kormila, detekcija brazde broda i sl.) i sinhronizuje rad svih elemenata uključenih u simulacioni model. Navedene funkcije PC izvršava u DOS okruženju. PC se koristi i za prikazivanje rezultata simulacije - memorisanih vektora stanja i njihovih analiza, korišćenjem nekih od softvera opšte namene za grafički prikaz rezultata simulacije.

U opštem slučaju, posao koji obavlja PC može se svesti na: digitalnu simulaciju dinamike i kinematike torpeda, rad kormila, generisanje i detekciju brazde broda, upravljanje (preko Burr - Brown D/A konvertora) troosnim simulatorom zaokretanja CARCO softverski generisanim signalima, očitavanje (preko A/D konvertora) signala sa brzinskog žiroskopa, integratora i bloka programa za samonavođenje i njihovo uključenje u odgovarajuće potprograme softvera za

HIL simulaciju, upravljanje (preko D/A konvertora) elektronskom opremom koja generiše signale identične signalima reflektovanim od brazde broda.

Biće opisani samo specifični moduli programa *TORPEDOH*. Na slici 8 je prikazan dijagram toka programa *TORPEDOH* za HIL simulaciju samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda. Na početku programa vrši se inicijalizacija A/D i D/A konvertora, postavljanje CARCO simulatora u početni položaj, unošenje početnih parametara i iniciranje varijabli stanja. Početni parametri su vreme simulacije t_{sim} , ugao pod kojim torpedo prvi put naiđe na brazdu broda, strana cilja u odnosu na smer kretanja torpeda i otklon kormila. Na osnovu početnog ugla preseka ivice brazde broda, vrši se početno pozicioniranje CARCO simulatora. Izvršava se inicijalizacija promenljivih stanja postavljanjem na nulu. Simulacija brazde broda realizuje se u posebnoj potprogramu generisanjem ordinate y_1 i y_2 . Startovanjem simulacije, iz elektronike USN, preko Burr - Brown



Slika 8. Dijagram toka programa TORPEDOH za HIL simulaciju samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda

A/D konvertora, u potprogram za samonavođenje dovode se signali $\dot{\eta}_i$ i $\dot{\eta}$.

Potprogram kormila, kao izlaz, daje odklon kormila za određeni ugao u odnosu na uzdužnicu torpeda, a potprogram dinamike torpeda informaciju o ugaonoj brzini zaokreta torpeda ω_{tor} . Formiranjem signala ω_{tor} inicira se potprogram za upravljanje simulatorom CARCO. Zaokretanje CARCO-a je poziciono, što znači da se u potprogramu za upravljanje simulatorom zaokretanja ugaona brzina integrali radi dobijanja ugla η i prosleđuje preko D/A konvertora. Zaokretanje simulatora CARCO registruje brzinski žiroskop a , preko A/D konvertora, signal η prosleđuje se u potprogram za samonavođenje. Preko A/D konvertora signal, koji predstavlja trenutni ugao zaokreta, dovodi se u potprogram za generisanje ugla trenutnog položaja torpeda u horizontalnoj ravni. Izlaz ovog potprograma je ugao η , koji se dobija sukcesivnim sabiranjem (za položaj cilja desno) ili oduzimanjem (za položaj cilja levo) trenutnog ugla zaokreta. Ugao η se uvodi u potprogram za transformaciju izlaznog vektora stanja u cilju izračunavanja vrednosti koordinata x i y .

Potprogram simulacije detekcije brazde broda, na osnovu trenutnog položaja torpeda i brazde broda u horizontalnoj ravni, određuje momenat ulaska u brazdu, boravak u njoj i trenutak napuštanja brazde. Na osnovu ovih podataka, potprogram za upravljanje elektronskom opremom omogućava da signali, koji odgovaraju signalima reflektovanim od brazde broda, budu prosleđeni u prijemnik.

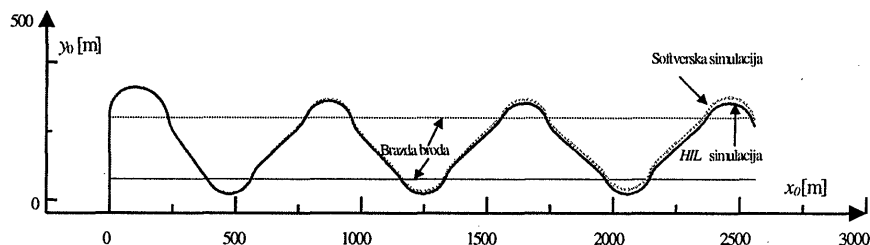
Hardverske komponente koje se koriste u HIL simulaciji su: hardver PC-a, simulator kretanja CARCO, USN i oprema za generisanje signala ekvivalentanih signalima koji se

dobijaju refleksijom od brazde broda. Elektronsko rele, u HIL simulaciji, pruža mogućnost da se pomoću PC-a, u trenucima ulaska torpeda u brazdu broda, propusti signal iz generatora impulsa u USN simulirajući, na taj način, detekciju brazde broda i isključivanje nakon napuštanja brazde broda.

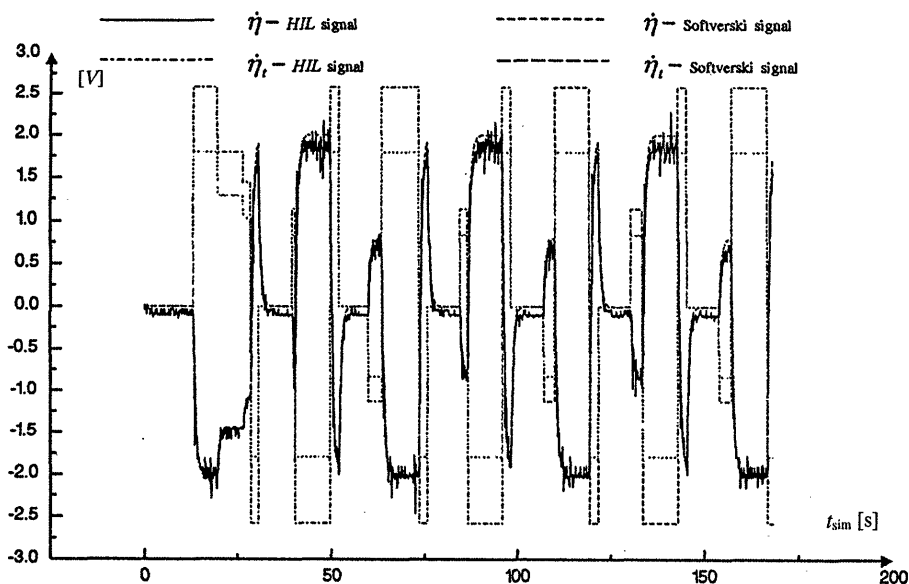
Rezultati HIL simulacije samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda

Testiranje HIL simulacionog modela samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda izvršeno je u uslovima koji su definisani prilikom testiranja softverske off - line simulacije [4,5]. Putanje torpeda, za različite nailaske na brazdu broda, prikazane su u horizontalnoj (x_0, y_0) ravni. Za početak kretanja torpeda uzeta je tačka (0,0). Referentni rezultati uzeti su iz softverske simulacije a na svakoj slici daju se, istovremeno, putanje dobijene HIL (puna linija) i softverskom simulacijom (isprekidana linija) radi njihovog upoređivanja. Uz svaku sliku, koja prikazuje putanje torpeda, data je slika sa signalima η i $\dot{\eta}$, snimljenim u proceduri softverske i HIL simulacije (sa realnim USN). Na sl.9 su prikazani rezultati dobijeni HIL i softverskom simulacijom samonavođenja kada akustičko torpedo nailazi na brazdu broda pod uglom $\Psi_0=90^\circ$.

Sa slike se uočava da prva odstupanja nastaju već posle prvog izlaska iz brazde, a najveća odstupanja su na kraju. Upoređenjem snimljenih signala (softverski generisani i mereni na realnom USN $\dot{\eta}_i$ i $\dot{\eta}$), uočava se razlika među njima, a što je ilustrovano na sl.10.



Slika 9. Putanje torpeda dobijene HIL i softverskom simulacijom samonavođenja akustičkog torpeda pri nailasku na brazdu broda pod uglom od 90°



Slika 10. Signali $\dot{\eta}$ i $\dot{\eta}_i$ iz softverske i HIL simulacije pri nailasku torpeda na brazdu broda pod uglom od 90°

Razlika u nivoima signala nastala je usled razlike između softverskog modela brzinskog žiroskopa i programa za samonavođenje u odnosu na hardversku realizaciju USN. Pravi razlog je dozvoljena tolerancija tačnosti koju elektronika USN poseduje, a što softverski model nema. Najveću grešku unosi integrator i sumator USN. Signal $\dot{\eta}$, sa brzinskog žiroskopa USN, zašumljen je, a njegovim integraljenjem i sabiranjem dobija se relativni položaj torpeda u horizontalnoj ravni. Dozvoljena odstupanja integratora i sumatora odrazila su se na putanji torpeda dobijenoj HIL simulacijom. Navedena tvrdnja posebno se odnosi na razliku u nivou pojačanja signala koje meri brzinski žiroskop.

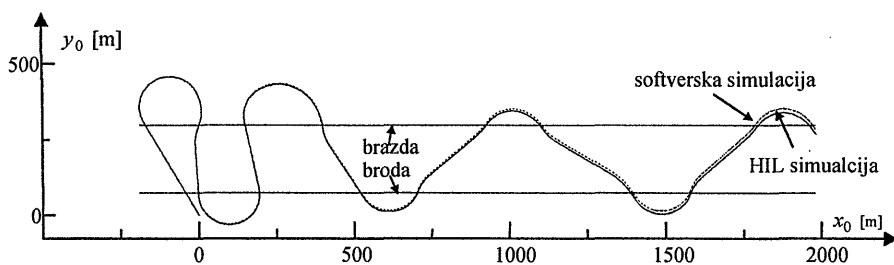
Na sl.11 su prikazane putanje dobijene HIL i softverskom simulacijom samonavođenja, kada torpedo nailazi na brazdu broda pod uglom $\Psi_0=120^\circ$.

Signali prikazani na sl.12, generisani u softverskoj simulaciji i snimljeni na realnom USN, u potpunosti odgova-

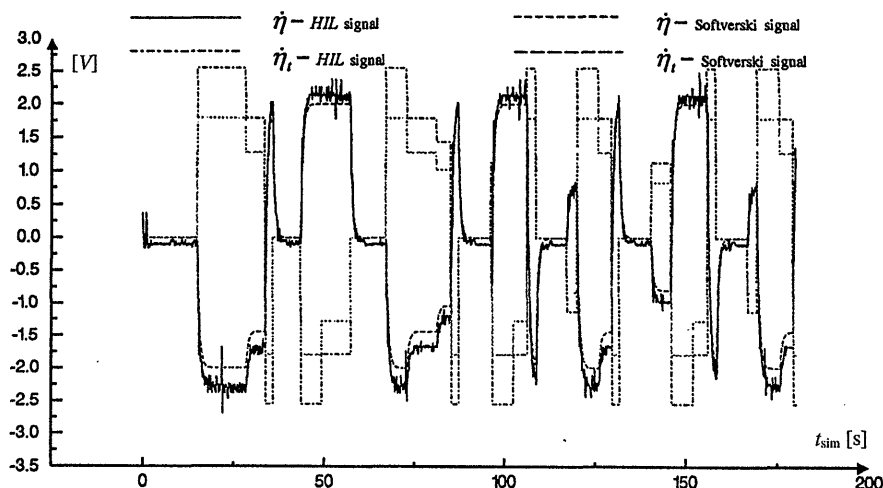
raju zaokretanjima torpeda na pojedinim delovima putanje sa sl.11. Odstupanje putanje HIL simulacije, u odnosu na putanju iz softverske, u granicama je odstupanja koje elektronika USN poseduje.

Na osnovu slika 13 i 14 zaključeno je da postoje manja odstupanja u putanjama i da signali generisani u softverskoj simulaciji i snimljeni pri HIL simulaciji USN u potpunosti odgovaraju zaokretanjima torpeda na pojedinim delovima putanje i međusobno su saglasni.

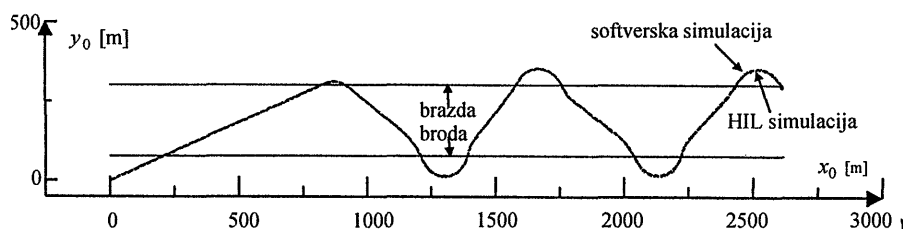
Na sl.15 su prikazane putanje HIL i softverske simulacije samonavođenja kada torpedo nailazi na brazdu broda pod uglom od 10° . Razlika među putanjama je najmanja u odnosu na sve prethodno analizirane. Na sl.16 su prikazani signali $\dot{\eta}_r$ i $\dot{\eta}$, koji su generisani softverskom simulacijom i mereni pomoću realnog USN, za slučaj samonavođenja torpeda pri nailasku na brazdu broda pod uglom od 10° .



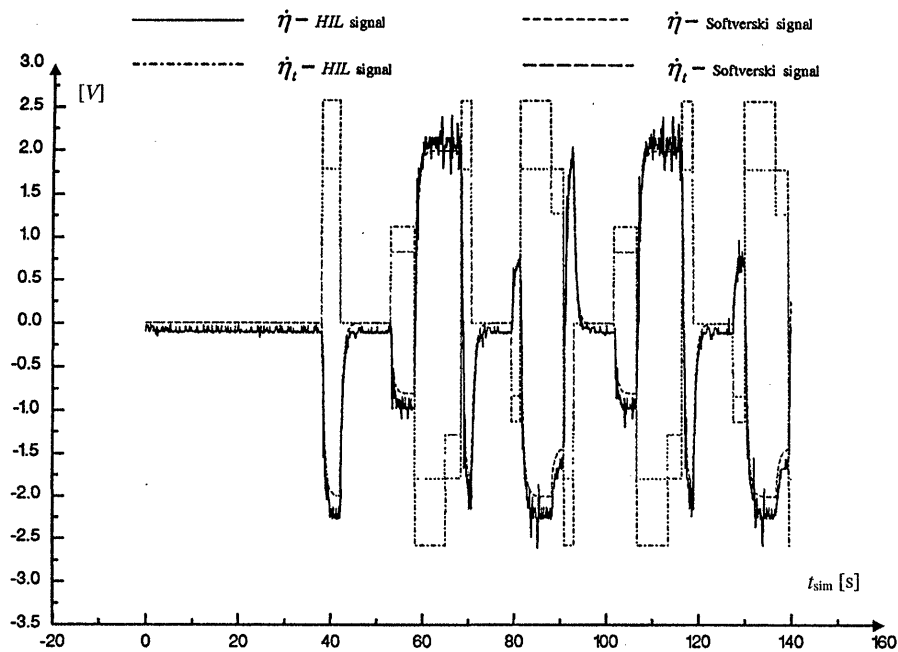
Slika 11. Putanja torpeda dobijena HIL i softverskom simulacijom samonavođenja akustičkog torpeda pri nailasku na brazdu broda pod uglom od 120°



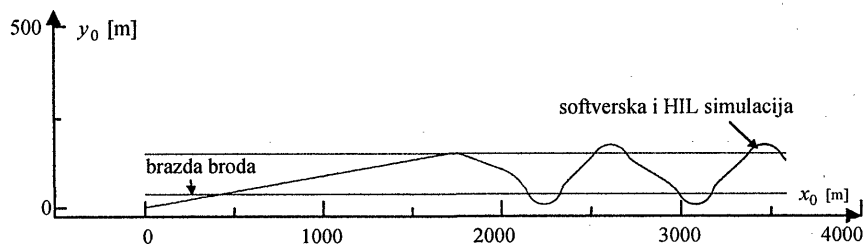
Slika 12. Signali $\dot{\eta}_i$ i $\dot{\eta}_r$ iz softverske i HIL simulacije pri nailasku torpeda na brazdu broda pod uglom od 120°



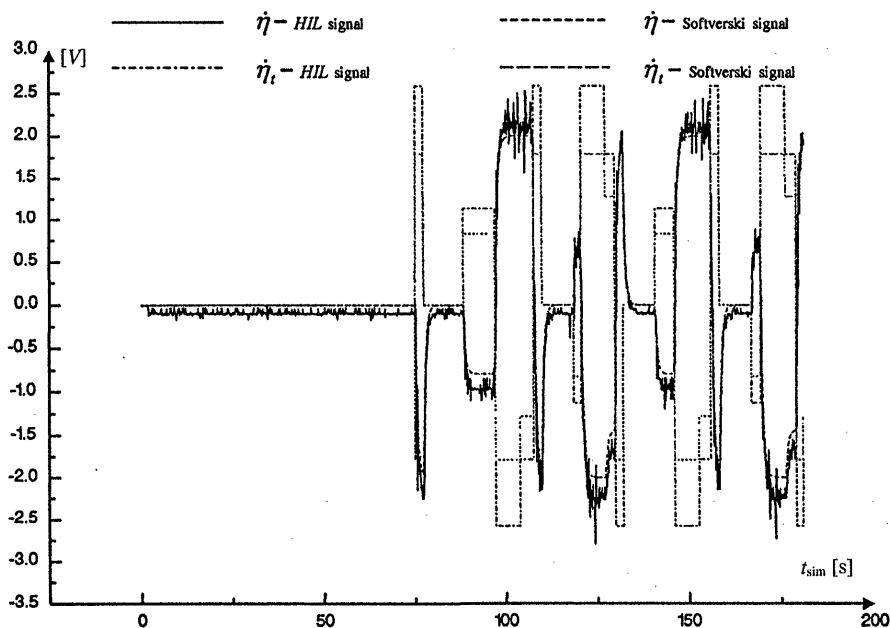
Slika 13. Putanje torpeda dobijene HIL i softverskom simulacijom samonavođenja akustičkog torpeda pri nailasku na brazdu broda pod uglom od 20°



Slika 14. Signali $\dot{\eta}$ i $\dot{\eta}_t$ iz softverske i HIL simulacije pri nailasku torpeda na brazdu broda pod uglom od 20°



Slika 15. Putanje torpeda dobijene HIL i softverskom simulacijom samonavođenja akustičkog torpeda pri nailasku na brazdu broda pod uglom od 10°



Slika 16. Signali $\dot{\eta}$ i $\dot{\eta}_t$ iz softverske i HIL simulacije pri nailasku torpeda na brazdu broda pod uglom od 10°

Zaključak

Realizovani koncept softversko-hardverske on-line simulacije (HIL) samonavođenja i upravljanja akustičkim torpedom u horizontalnoj ravni, zasnovan na modularnom

principu, omogućava kompleksnu analizu sistema za samonavođenje torpeda na brazdu broda i parcijalna ispitivanja delova sistema za samonavođenje. Prezentovana varijanta HIL simulacije i rezultati testiranja u laboratorijskim uslovima, na konkretnom primeru, omogućavaju primenu ove

savremene metode i pri postupcima projektovanja (razvojne laboratorije), proizvodnje (fabričke završne kontrole) i eksploatacije (kontrolno - merne provere) torpeda samonavođenog na brazdu broda i sistema za samonavođenje plovila uopšte.

Dobijeni rezultati predstavljaju svojevrsnu verifikaciju i matematičkog modela sistema za samonavođenje akustičkog torpeda na brazdu broda primenjenog u ovom radu. Odstupanja rezultata HIL simulacije su, u odnosu na rezultate softverske *off - line* simulacije, u dijapazonu 15%-20%, a to je u granicama tačnosti datim u odgovarajućoj tehničkoj dokumentaciji za elektroniku konkretnog torpeda [9]. Smanjenje ugla nailaska torpeda na brazdu broda uzrokuje veće poklapanje putanja dobijenih softverskom (*off - line*) i softversko-hardverskom (HIL) on-line simulacijom.

Literatura

[1] MINOVIĆ, S. *Osnovi teorije samonavođenih raketa*. VINC, Beograd, 1987.

- [2] KRINECKIJ, E.N. *Sistemi samonavedenija*. Mašinstroenie, Moskva, 1970.
- [3] DORODNI, V.P. *Torpedi*. DOSAAF SSSR, 1986.
- [4] RADOSAVLJEVIĆ, M. *Modelovanje i softversko-hardverska simulacija upravljanja akustičkim torpedom*. magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1999
- [5] RADOSAVLJEVIĆ, M., MILOVANOVIĆ, M., MATAUŠEK, M. *Softverska i softversko-hardverska simulacija samonavođenja akustičkog torpeda na brazdu broda*. XLII konferencija ETRAN-a, 1998.
- [6] MILOVANOVIĆ, M. HIL simulacija poluautomatskog sistema vođenja i upravljanja protivoklopne rakete. *Naučnotehnički pregled*, 1995, no.1-2, p.115 - 125.
- [7] MILOVANOVIĆ, M. *HIL simulacija leta vođene rakete*. ETRAN, Beograd, 1993.
- [8] PODOBRIJ, G.M. i dr. *Teoretičeskie osnovi torpednogo oružija*. Voennoe izdatel'stvo Ministarstva oboroni SSSR, Moskva 1969.
- [9] ...Uređaj za samonavođenje na trag broda - Tehnički opis (prevod).
- [10] RADOSAVLJEVIĆ, M. Torpedo, oružje velike razorne moći. *Novi glasnik*, maj - avgust, 1997, p.84-90.

Rad primljen: 23.10.1998.god.