ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 10(82)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

IV MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
EXPLO-SHIP 2006

Andrzej Stefanowski

Koncepcje sterowania elektrohydrauliczną maszyną sterową statku z pompą o stałej wydajności zwiększającego dokładność statyczną układu

Słowa kluczowe: sterowanie automatyczne, sterowanie statkiem, regulacja trójstawna z korekcją dynamiczną

W artykule przedstawiono własności układu nadążnego realizującego wychylenia steru statku zbudowanego z wykorzystaniem pompy hydraulicznej stałego wydatku. Ponadto zaprezentowano różne rozwiązania układu sterowania z wykorzystaniem dynamicznego sprzężenia zwrotnego wokół regulatora trójpołożeniowego sterującego rozdzielaczem elektrohydraulicznym maszyny sterowej zwiększającego dokładność tego układu w stanach statycznych. Przedstawiono wyniki symulacji działania prezentowanych rozwiązań.

Ideas on Steering Gear Control with Hydraulic Pump of Constant Delivery Enhancing Steady Accuracy

Key words: automatic control, ship control, three-point dynamic correction control

The paper shows properties of the follow-up system for rudder deflection using a hydraulic pump of constant delivery. Several solutions of a system using a three-point controller with dynamic feedback to enhance the steady-state accuracy are discussed. The results of simulative research are presented.

Wstęp

Maszyna sterowa (MS) statku to urządzenie, od którego poprawnej i niezawodnej pracy zależy w znacznym stopniu bezpieczeństwo statku, szczególnie w wysokich stanach morza. W wysokich stanach morza, przy sterowaniu autopilotem, maszyna sterowa jest często przeciążana, tj. pracuje poza przedziałem projektowanych wskaźników, co prowadzi do nadmiernego nagrzania jej elementów (np. silników elektrycznych głównych i nastawczych, pomp hydraulicznych, siłowników) i czynnika roboczego – oleju hydraulicznego. Przeciążenie MS jest sygnalizowane alarmem. Reakcją na ten alarm jest działanie załogi polegające na odłączeniu maszyny od autopilota i sterowanie nią (i statkiem) w sposób ręczny przez sternika celem szybkiego jej ostudzenia. Powodów pracy MS poza przedziałami projektowych parametrów jest wiele. Najważniejszy z nich to zbyt mała moc MS dla tych wysokich stanów morza (moc maszyny porównywalna jest z mocą zakłóceń działających na statek od środowiska dla stanu morza 4). Dobór mocy MS dla potrzeb sterowania, np. utrzymania statku na kursie, jest zagadnieniem oddzielnym i nie będzie rozpatrywany w niniejszym artykule. Jednym z działań odciążających maszynę sterową jest ograniczenie ilości niepotrzebnych nawrotów na skutek przeregulowania w stosunku do zadanej wartości jej wychylenia będącego wynikiem znacznej bezwładności mechanizmu i opóźnienia w działaniu. Problem dotyczy szczególnie maszyn sterowych z pompą hydrauliczną stałego wydatku sterowaną w sposób skokowy – regulatorem trójpołożeniowym.

1. Cechy maszyny sterowej statku jako obiektu sterowania

Z punktu widzenia automatyki, elektro-hydrauliczna maszyna sterowa z pompą o stałej wydajności charakteryzuje się, między innymi, następującymi własnościami wynikającymi z założeń projektowych, jak i z przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych:

- podstawowym rodzajem pracy jest praca w układzie nadążnym (nadążanie za sygnałem regulatora kursu – sterowanie automatyczne statkiem, bądź za sygnałem wytwarzanym w przetworniku związanym z kołem sterowym – sterowanie ręczne statkiem);
- posiada ograniczoną moc w stosunku do potrzeb sterowania automatycznego przy wysokich stanach morza;
- posiada ograniczoną maksymalną prędkość kątową przestawiania steru (3 – 6°/s);
- ma ograniczony zakres przestawiania steru (–35° +35°);

- charakteryzują się dużą bezwładnością części mechanicznej;
- pasmo przenoszenia sygnałów harmonicznych jest znacznie ograniczone od góry z uwagi na ograniczoną moc i ograniczoną prędkość ;
- dynamika członu siłowego może być przedstawiona dynamiką elementu całkującego z inercją i opóźnieniem, w której wzmocnienie i stała czasowa zależą od wielkości wychylenia steru oraz od kierunku obrotu steru – w kierunku burty lub kierunku płaszczyzny symetrii kadłuba (moment siły powstającej na wychylonej płetwie steru względem osi obrotu trzonu sterowego dodaje się lub odejmuje od momentu napędowego maszyny);
- wykazuje pewne opóźnienie czasowe w działaniu w stosunku do sterowania;
- sterowanie kierunkiem przepływu oleju do cylindrów roboczych maszyny jest sterowaniem silnie nieliniowym („trójpołożeniowym" z nieczułością i histerezą).

Dla analizy działania MS i modelowania procesów dynamicznych przyjmuje się szereg założeń upraszczających np.: stałość wzmocnienia i stałych czasowych członu siłowego, przestawianie rozdzielaczy elektrohydraulicznych w pomijalnie krótkim czasie, stałość napięcia zasilającego silnik napędowy pompy, brak wpływu na ciśnienie w układzie zaworów bezpieczeństwa, stałość charakterystyk przetworników itp.

2. Koncepcje sterowania

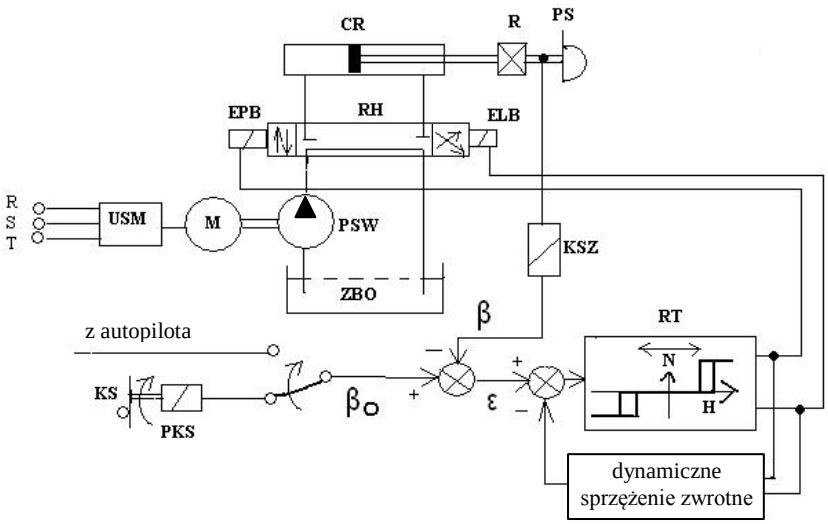
2.1. Ogólne założenia

Przykładową realizację uproszczonego sterowania MS z pompą o stałej wydajności pokazano na rysunku 1.

W uproszczeniu działanie układu można przedstawić następująco:

Zmiana zadanej wartości kąta wychylenia steru β_o, która daje wartość błędu ε większą od progu działania regulatora trójpołożeniowego powoduje zasilenie jednej z cewek rozdzielacza elektrohydraulicznego np. *EPB* prawej burty, co powoduje przyłączenie pompy do cylindra roboczego siłownika i ruch steru w kierunku prawej burty. Przestawianie steru powoduje zmianę sygnału β rzeczywistego kąta wychylenia steru dającego zmniejszenie sygnału błędu ε. Po zmniejszeniu ε do wartości poniżej progu wyłączania regulatora, zasilenie cewki *EPB* rozdzielacza zostaje zdjęte, a dalsze przestawianie steru (zatrzymywanie) odbywa się dzięki energii kinetycznej układu. Kąt, przy którym zatrzyma się ster, najczęściej nie zgadza się z kątem zadanym. Im większą energię kinetyczną ma układ (większą rozwiniętą przez układ prędkość przed zdjęciem zasilania z cewki rozdzielacza) tym „kąt wybiegu steru" jest większy. Gdyby kąt

wybiegu był na tyle duży, że nastąpi zmiana znaku sygnału błędu ε i jego wartość przekroczy próg działania regulatora dla przeciwnego kierunku, wówczas zasilona zostanie cewka *ELB* lewej burty, co spowoduje przesterowanie układu powodującego ruch steru w kierunku powrotnym, zmniejszanie sygnału ε, zdjęcie zasilania z *ELB* i wybieg steru. Jeśli kąt wybiegu będzie podobny jak przy ruchu steru w kierunku prawej burty, układ (ster) wpadnie w niegasnące drgania. Taka praca maszyny nie powinna mieć miejsca. Maszyna wykonuje niepotrzebne przestawienia dające straty energii elektrycznej, spadek prędkości statku, straty energii w układzie hydraulicznym. Efektem takiej pracy jest wzrost temperatur i szybsze zużycie elementów maszyny.



Rys. 1. Uproszczony schemat sterowania MS z pompą o stałej wydajności
Fig. 1. Simplified diagram of steering engine control using a constant delivery pump

Przyjęte oznaczenia: *CR* – cylinder roboczy; *R* – przekładnia; *PS* – płetwa steru; *RH* – rozdzielacz elektrohydrauliczny; *EPB, ELB* – elektromagnesy (cewki) sterowania ustawieniem kierunku przepływu oleju dającym ruch płetwy w kierunku prawej burty, lewej burty; *PSW* – pompa hydrauliczna stałej wydajności; *M* – silnik elektryczny napędzający pompę; *USM* – układ sterowania elektrycznym silnikiem napędowym; *ZBO* – zbiornik oleju; *KS* – koło sterowe; *PKS* – przetwornik koła sterowego; β_o – sygnał zadanego wychylenia steru; β – sygnał rzeczywistego kąta wychylenia steru; ε – sygnał błędu ustawienia steru; *RT* – regulator trójpołożeniowy; *N* – nieczułość regulatora; *H* – histereza regulatora; *KSZ* – przetwornik sygnału kąta wychylenia steru w sprzężeniu zwrotnym.

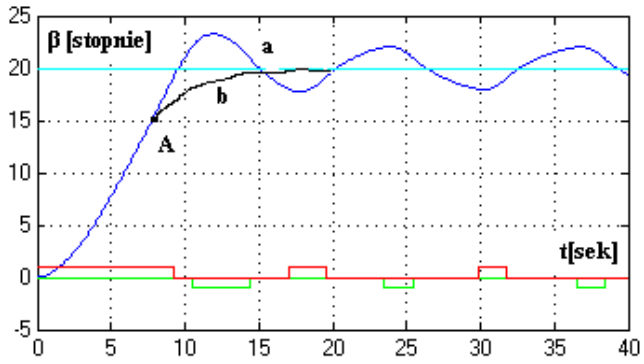
Prostym rozwiązaniem (stosowanym w praktyce) jest rozszerzenie strefy nieczułości *N* regulatora trójpołożeniowego. Rozszerzenie tej strefy prowadzi jednak do znacznych niedokładności (rzędu kilku stopni) w zrealizowaniu zadanego kąta wychylenia steru.

Zwiększenie dokładności „odpracowania” kąta zadanego z uzyskaniem inercyjnego charakteru przestawiania steru jest możliwe dzięki zastosowaniu regulatora trójpołożeniowego z korekcją dynamiczną.

2.2. Rozwiązania układu sterowania zwiększające dokładność statyczną

Uzyskanie efektu ustalania się kąta położenia steru na wartości zadanej, podanej skokowo, bez wystąpienia oscylacji lub przeregulowania, jest możliwe dzięki sterowaniu rozdzielaczem elektrohydraulicznym z wyprzedzeniem, tj. wcześniejszemu odłączeniu pompy hydraulicznej od cylindrów, co spowoduje wcześniejsze zatrzymanie się mechanizmu.

Rysunek 2 przedstawia zmiany kąta wychylenia steru β jako odpowiedź na skokowo podaną wartość zadaną β_o. Krzywa *a* ilustruje zmianę tego kąta w przypadku sterowania regulatorem trójpołożeniowym *RT* z wąską strefą nieczułości – obserwuje się pojawienie oscylacji niegasnących wokół wartości zadanej. Krzywa *b* ilustruje zmianę tego kąta przy tych samych parametrach regulatora *RT* lecz z zastosowanym wyprzedzeniem wyłączenia rozdzielacza (wyłączenie w punkcie *A*).



Rys. 2. Zmiana kąta wychylenia steru β przy skokowo podanej wartości zadanej (*a* – regulator *RT* bez korekcji, *b* – regulator *RT* z korekcją)

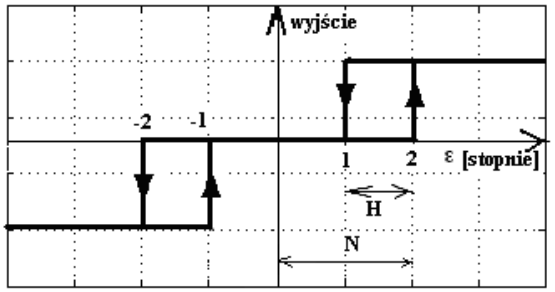
Fig. 2. Changes of rudder deflection angle caused by step variation of set-point value (a – RT-type controller without correction, b – RT-type controller with correction)

Efekt wcześniejszego wyłączenia rozdzielacza i odłączenia pompy od cylindrów można uzyskać następującymi sposobami:

- przez dynamiczną zmianę charakterystyki regulatora *RT* (np. w funkcji czasu) przyłączenia pompy do cylindrów roboczych),
- przez dynamiczną zmianę sygnału błędu ε na wejściu regulatora *RT*,
- przez dynamiczną zmianę sygnału rzeczywistego kąta wychylenia steru β.

2.2.1. Dynamiczna zmiana charakterystyki regulatora RT

Charakterystyka statyczna regulatora *RT* przedstawiona jest na rysunku 3. Dynamiczna zmiana charakterystyki tego regulatora może dotyczyć bądź strefy nieczułości *N*, bądź szerokości pętli histerezy *H*, bądź pojedynczych progów przełączania.



Rys. 3. Charakterystyka statyczna regulatora *RT*
Fig. 3. Steady-state characteristic of RT-type controller

Zmiana odpowiedniej wartości parametru regulatora w funkcji czasu dokonywana jest według funkcji wykładniczej

$$\Delta\mathcal{E}_N(t) = k(1 - \exp(-t/T)) \tag{1}$$

lub

$$\Delta\mathcal{E}_N(t) = k \exp(-t/T) \tag{2}$$

gdzie: $\Delta\mathcal{E}_N(t)$ – zmiana strefy nieczułości; N, k, T – parametry.

Funkcja (1) i (2) jest generowana na wyjściu elementu inercyjnego pierwszego rzędu pobudzanego skokowymi wartościami sygnału z wyjścia regulatora *RT*. Uzasadnieniem wyboru tej funkcji jest potrzeba osiągania mniejszych wyprzedzeń w odłączeniu pompy od cylindrów roboczych wtedy, gdy ster osiąga małe prędkości kątowe (co ma miejsce przy niewielkich przyrostach kąta zadanego β_o) i uzyskanie dużego, prawie stałego, wyprzedzenia wtedy, gdy ster rozwinie pełną prędkość kątową (w przypadku dużych przyrostów β_o).

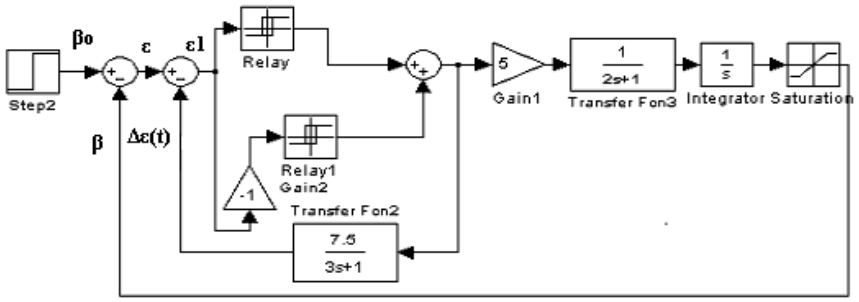
Rozwiązanie techniczne wykorzystujące dynamiczną zmianę progów przełączania regulatora *RT*, dające w rezultacie potrzebną zmianę szerokości strefy nieczułości *N*, zastosowano w konstrukcji komparatorów tworzących regulator trojpołożeniowy w polskim autopilocie TS-75. Nastrojenie układu sterowania

polega na optymalnym doborze nieczułości *N* regulatora, szerokości pętli histerezy *H*, wzmocnienia *k* i stałej czasowej *T* elementu inercyjnego.

2.2.2. Dynamiczna zmiana sygnału błędu na wejściu regulatora *RT*

Efekt dynamicznej zmiany progów działania regulatora *RT* można uzyskać bez ingerowania w jego charakterystykę przez dynamiczną zmianę sygnału błędu ε podawanego na jego wejście. Zmiana polega na odejmowaniu od sygnału błędu ε sygnału korekcyjnego $\Delta\varepsilon(t)$. Nowy sygnał błędu ε_1 przetwarzany jest przez regulator ($\varepsilon_1 = \varepsilon - \Delta\varepsilon(t)$).

Sygnał korekcyjny $\Delta\varepsilon(t)$ generowany jest na wyjściu elementu inercyjnego pierwszego rzędu pobudzanego skokowymi wartościami sygnału wyjściowego regulatora *RT*. Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy nadążnego sterowania płetwą steru, gdzie dynamikę części mechaniczno-hydraulicznej zamodelowano jako układ całkujący z inercją i ograniczeniem oraz pokazano sposób utworzenia dynamicznego (inercyjnego) sprzężenia zwrotnego wokół regulatora generującego sygnał $\Delta\varepsilon(t)$.

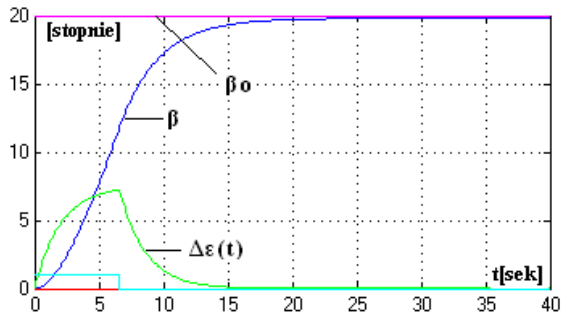


Rys. 4. Model układu nadążnego steru z inercyjnym sprzężeniem zwrotnym wokół regulatora
Fig. 4. Diagram of the rudder follow-up system using a controller with feedback of inertial nature

Na rysunku 5 pokazano przebieg sygnałów w układzie z rysunku 4 jako odpowiedź na skokową zmianę sygnału β_o po dobraniu parametrów *N, H* regulatora oraz *k* i *T* sprzężenia zwrotnego, zaś na rysunku 6 pokazano działanie układu w dynamice przy wymuszeniu falą prostokątną. Należy zauważyć dużą precyzję uzyskiwania przez układ zadanych wartości β_o.

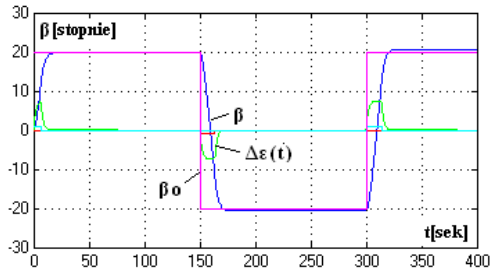
W praktyce, każdy z komparatorów przełączających regulatora *RT* obejmuje się oddzielnym sprzężeniem zwrotnym. Rozwiązanie takie umożliwia kształtowanie własności sprzężeń zwrotnych (i sposobu działania układu) dla każdego kierunku ruchu steru niezależnie.

Model układu według tego rozwiązania pokazano na rysunku 7, zaś wyniki symulacji po doborze wartości *N, H, k, T* na rysunkach 8 i 9.



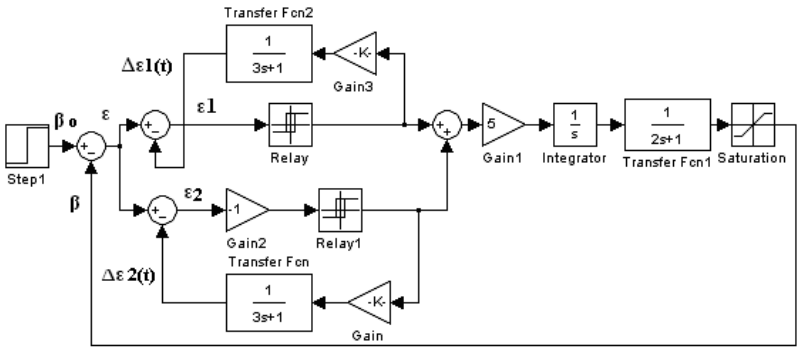
Rys. 5. Zmiana kąta wychylenia steru β i sygnału inercyjnego sprzężenia zwrotnego $\Delta\varepsilon(t)$ przy skokowo podanej wartości zadanej β_o

Fig. 5. Changes of rudder deflection angle β and feedback signal $\Delta\varepsilon(t)$ caused by step variation of set-point value β_o



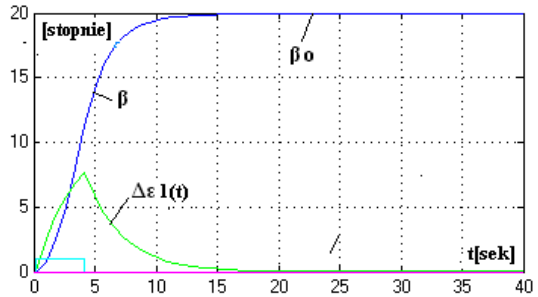
Rys. 6. Zmiana kąta wychylenia steru β przy skokowo zmienianych wartościach zadanych β_o w układzie z regulatorem *RT* objętym inercyjnym sprzężeniem zwrotnym

Fig. 6. Changes of rudder deflection angle β caused by step variation of set-point value β_o in a system with RT-type controller with corrective feedback of inertial nature



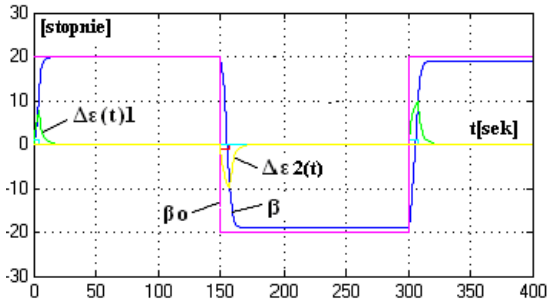
Rys.7. Model układu nadążnego steru z dwoma inercyjnymi sprzężeniami zwrotnymi wokół regulatora

Fig. 7. Model of the follow-up system containing double corrective feedback of inertial nature



Rys. 8. Zmiana kąta wychylenia steru β i sygnału inercyjnego sprzężenia zwrotnego $\Delta\varepsilon_1(t)$ przy skokowo podanej wartości zadanej β_o

Fig. 8. Changes of rudder deflection angle β and feedback signal $\Delta\varepsilon(t)$ caused by step variation of set-point value β_o



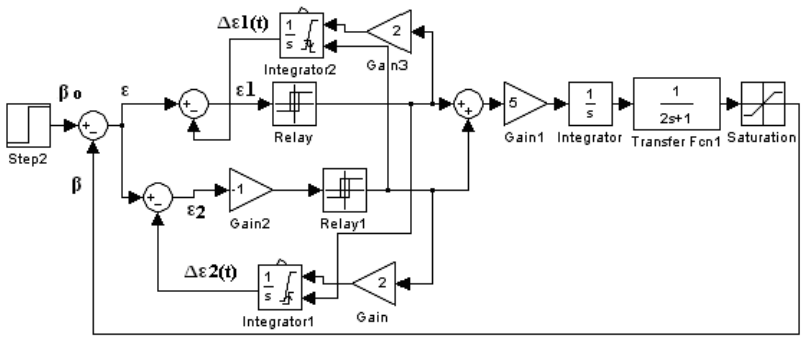
Rys. 9. Zmiana kąta wychylenia steru β przy skokowo zmienianych wartościach zadanych β_o w układzie z regulatorem *RT* objętym dwoma inercyjnymi sprzężeniami zwrotnymi

Fig. 9. Changes of rudder deflection angle β caused by step variation of set-point value β_o in system with RT-type controller with corrective feedback of inertial nature

Kształt sygnału $\Delta\varepsilon(t)$ powinien być dostosowany do prędkości zmian kąta wychylenia steru. Prędkość ta zmienia się w szerokim zakresie w początkowym okresie przyłączenia pompy do cylindrów roboczych (np. narasta) i ustala się po czasie tzw. „rozbiegu steru". Podobne cechy powinien posiadać sygnał $\Delta\varepsilon(t)$. Do generacji sygnału $\Delta\varepsilon(t)$ można zatem użyć układów inercyjnych wyższych rzędów lub układów całkujących z ograniczeniem.

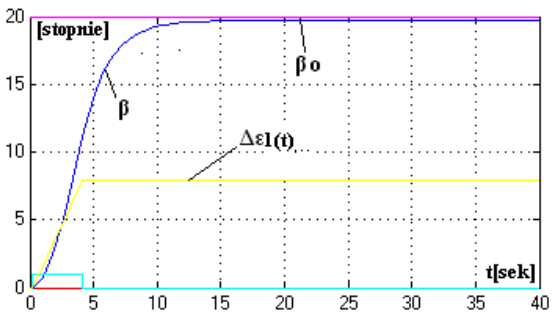
Zastosowanie układów całkujących z ograniczeniem, obejmujących oddzielnie każdy z komparatorów regulatora, wymaga kasowania ich sygnałów wyjściowych. Kasowanie powinno nastąpić najpóźniej w chwili przełączenia rozdzielacza (i pompy) na przeciwny kierunek tłoczenia do cylindrów roboczych.

Model układu według tego rozwiązania pokazano na rysunku 10 zaś wyniki symulacji po doborze optymalnych wartości *N*, *H*, *k*, *T* – na rysunkach 11 i 12.



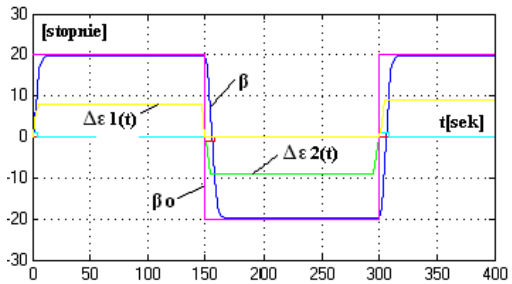
Rys.10. Model układu nadążnego steru z dwoma całkującymi sprzężeniami zwrotnymi wokół regulatora

Fig. 10. Diagram of the rudder follow-up system using RT-type controller with double feedback of integrating nature



Rys. 11. Zmiana kąta wychylenia steru β i sygnału całkującego sprzężenia zwrotnego $\Delta\varepsilon_1(t)$ przy skokowo podanej wartości zadanej β_o

Fig. 11. Changes of rudder deflection angle β and feedback signal $\Delta\varepsilon(t)$ caused by step variation of set-point value β_o



Rys. 12. Zmiana kąta wychylenia steru β przy skokowo zmienianych wartościach zadanych β_o w układzie z regulatorem *RT* objętym dwoma całkującymi sprzężeniami zwrotnymi

Fig. 12. Changes of rudder deflection angle β at step varying value of set-point β_o in system containing RT-type controller with double feedback of integrating nature

2.2.3. Dynamiczna zmiana sygnału rzeczywistego kąta wychylenia steru

Dla uzyskania efektu dynamicznej zmiany progów przełączania regulatora *RT* bez ingerowania w jego charakterystykę można dynamicznie zmieniać sygnał rzeczywistego kąta wychylenia steru β.

Nowy sygnał β' uzyskuje się z zależności:

$$\beta' = \beta + \Delta\beta(t) \tag{3}$$

co w efekcie daje sygnał błędu pomniejszony o $\Delta\beta(t)$ i wprowadzenie wyprzedzenia w działaniu regulatora *RT* ($\varepsilon_1 = \beta_o - \beta' = \beta_o - \beta - \Delta\beta(t) = \varepsilon - \Delta\beta(t)$). Sygnał korekcyjny $\Delta\beta(t)$ generuje się podobnie jak w rozwiązaniach omówionych wcześniej (w układach inercyjnych sterowanych z wyjścia regulatora *RT*).

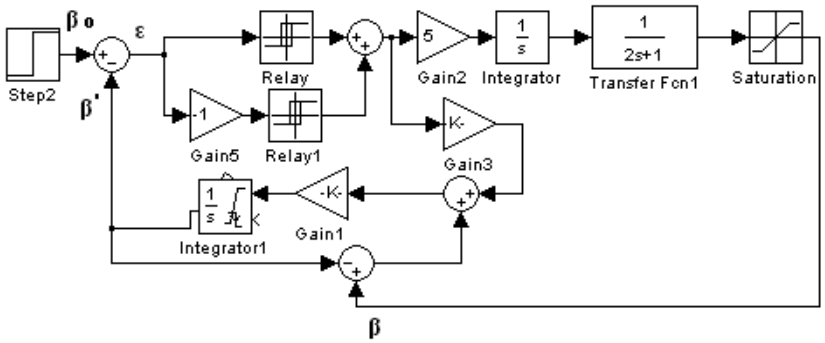
W praktyce spotyka się powyższe rozwiązanie w układzie sterowania maszyną sterową autopilota firmy Decca-Arkas. W rozwiązaniu tym nowy sygnał $\beta'(s)$ tworzy się wg następującej zależności:

$$\beta'(s) = \beta(s)\,(1/(1+sT)) + A(s)\,(k/(1+sT) \tag{4}$$

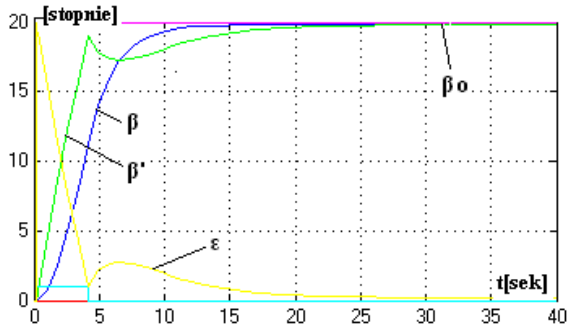
gdzie: $\beta(s)$ i $A(s)$ są transformatami sygnałów $\beta(t)$ i $A(t)$ – rzeczywistego kąta wychylenia steru i sygnału wyjściowego regulatora *RT*.

Z zależności (4) wynika, że sygnał rzeczywistego kąta wychylenia steru filtruje się układem inercyjnym i zwiększa go o sygnał korekcyjny uzyskany z układu inercyjnego sterowanego skokowymi wartościami sygnału wyjściowego regulatora *RT* – suma tych sygnałów daje skorygowany sygnał β'.

Model układu według tego rozwiązania pokazano na rysunku 13, zaś wyniki symulacji po doborze wartości *N, H, k, T* – na rysunkach 14 i 15.

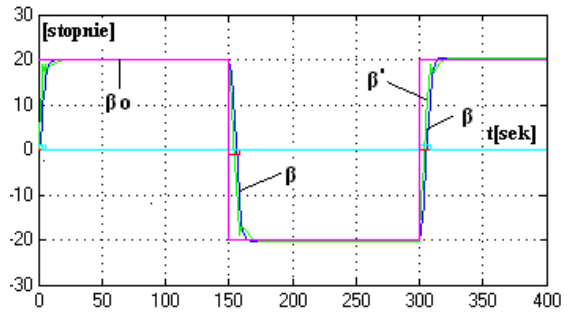


Rys. 13. Model układu nadążnego steru z korekcją sygnału rzeczywistego wychylenia steru
Fig. 13. Diagram of the follow-up system with correction of real rudder deflection signal



Rys. 14. Zmiana kąta wychylenia steru β i sygnału skorygowanego β' przy skokowo podanej wartości zadanej β_o

Fig. 14. Changes of rudder deflection β and corrected signal β' caused by step variation of set-point value β_o



Rys. 15. Zmiana kąta wychylenia steru β przy skokowo zmienianych wartościach zadanych β_o w układzie z korekcją sygnału rzeczywistego wychylenia steru

Fig. 15. Changes of rudder deflection β at step varying value of set-point β_o in system with correction of real rudder deflection signal

Podsumowanie

Przedstawione rozwiązania bazują na tzw. dynamicznym sprzężeniu zwrotnym wokół regulatora trójpołożeniowego. Jeśli sygnał błędu układu ε zmienia się wolniej niż sygnał korekcyjny, to w zakresie działania sygnału korekcyjnego mogą wystąpić przełączenia wartości sygnału regulatora *RT*, których częstotliwość zależy od szerokości strefy *N*, strefy *H*, dynamiki sprzężenia zwrotnego i prędkości zmian ε. Dobór wartości decyduje więc nie tylko o dokładności statycznej (i dynamicznej) układu, ale również o intensywności pracy rozdzielacza elektro-hydraulicznego maszyny sterowej przyłączającego i odłączającego pompę hydrauliczną do cylindrów roboczych. Częstotliwość przełączeń rozdzielacza

nie może być zbyt duża ze względu na uderzenia ciśnienia hydraulicznego w układzie. Dobór parametrów powinien zapewnić minimalną liczbę przyłączeń pompy do cylindrów dla zrealizowania zadanego wychylenia steru (np. dla zadanego kąta w postaci skoku jednostkowego – jedno przyłączenie). Ten wymóg ogranicza zakres stosowania zasad doboru nastaw parametrów przyjmowanych dla regulatorów krokowych, budowanych również wg koncepcji sprzężenia dynamicznego wokół regulatora trójpołożeniowego (w omawianych rozwiązaniach regulator *RT* z korekcją dynamiczną steruje w maszynie sterowej członem całkującym, więc można część układu traktować jak regulator krokowy sterujący układem inercyjnym). W praktyce doboru parametrów dokonuje się drogą modelowania i drogą doświadczalną bezpośrednio na rzeczywistym układzie.

Literatura

1. Dokumentacja techniczna autopilota Decca.
2. Dokumentacja techniczna telemanipulatora steru TS- 75.
3. Findeisen W., *Technika regulacji automatycznej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1978.
4. Waguszczenko L. L., Cymbał N. N., *Sistiemy awtomaticzeskowo uprawlienia dwiżieniem sudna*, Latstar, Odessa 2002.
5. Wyszkowski J., Wyszkowski Sł., *Elektrotechnika okrętowa*. *Napędy elektryczne*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 1998.
6. Wyszkowski Sł., *Autopiloty okrętowe*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1982.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2006 r.

Recenzent

dr hab. inż. Zygmunt Paszota, prof. PS

Adres Autora

dr inż. Andrzej Stefanowski
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej
Zakład Automatyki Okrętowej
70-500 Szczecin, Wały Chrobrego 1-2
tel. (091) 4809385
e-mail: astef@am.szczecin.pl