

**FUNDACJA ROZWOJU  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE**

***FRAGMENTY KSIĄŻKI PT.:*  
URZĄDZENIA NAWIGACJI  
TECHNICZNEJ**

autorstwa:

**Maciej Gucma**

**Jakub Montewka**

**Antoni Zieziula**

**Szczecin 2005**

Rozdział 3, *Automatyczne sterowanie kursem statku*  
autor: Jakub Montewka <email: Jakub@am.szczecin.pl>

Jak cytować?

**M. Gucma, J. Montewka, A. Zieziula, *Urządzenia Nawigacji Technicznej*.**  
Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2005.

### 3. Automatyczne sterowanie kursem statku

Automatyczne sterowanie kursem statku, umożliwiające utrzymanie statku na zadanym kursie, zastępujące w tej czynności sternika, realizowane jest poprzez układ automatycznego sterowania, którego integralnym elementem jest układ autopilota.

Autopilot nazywany inaczej pilotem automatycznym sprzężony jest bezpośrednio z maszyną sterową, odpowiedzialną za pracę steru (urządzenie wykonawcze). Wychylenia steru wpływają na zmianę kursu statku (korekcję trasy), w przypadku gdy kurs statku różni się od kursu zadanego w układzie autopilota.

Obecnie statki morskie sterowane są ręcznie w zasadzie tylko podczas manewrowania, przejścia przez kanały i morskie cieśniny o dużym natężeniu ruchu statków oraz w czasie wyjątkowo ciężkiej, sztormowej pogody.

Automatyczne sterowanie statkiem pozwala na zmniejszenie liczby i rozmiaru odchyłeń od wyznaczonego kursu w porównaniu ze sterowaniem ręcznym. Korzyści płynące z tego faktu to m. in.:

- wzrost średniej prędkości statku,
- oszczędności w eksploatacji statku,
- skrócenie czasu rejsu,
- zmniejszenie zużycia paliwa.

Samoczynne utrzymywanie się statku na określonym kursie możliwe jest za pomocą żyrokompasów lub kompasów magnetycznych. Autopiloty stosowane obecnie na statkach nie są urządzeniami w pełni zautomatyzowanymi, aczkolwiek wchodząc w skład systemów nawigacji zintegrowanej umożliwiają prowadzenie statku po wyznaczonej uprzednio drodze.

W rozdziale omówione zostaną następujące zagadnienia związane z budową, obsługą oraz eksploatacją autopilotów morskich:

- ogólna charakterystyka automatycznego pilota,
- zasady współpracy autopilota z urządzeniami sterowymi,
- właściwości sterownicze statku,
- zasada działania autopilotów,
- zasady regulacji autopilotów.

#### 3.1. Ogólna charakterystyka automatycznego pilota

Urządzenie sterowe składa się z trzech podstawowych elementów:

- telemanipulator steru to urządzenia służące do sterowania pracą maszyny sterowej (podstawową częścią telemanipulatora jest kolumna sterowa),
- maszyna sterowa służąca do obsługi płetwy sterowej, ze względu na typ przekładni można wyróżnić dwa rodzaje maszyny sterowej:

- urządzenia sterowe z przekładnią mechaniczną (urządzenia elektro-mechaniczne),
  - urządzenia sterowe z przekładnią hydrauliczną (urządzenia elektro-hydrauliczne);
- ster.

Sterowanie pracą maszyny sterowej odbywa się z kolumny sterowej znajdującej się na mostku. Dodatkowo konsole sterowe mogą znajdować się na skrzydłach mostka oraz w maszynowni statku.

Oprócz tego wymagane są również stanowiska sterowania awaryjnego z poziomu maszyny sterowej. Sterowanie awaryjne polega na ręcznej obsłudze siłowników odpowiedzialnych za wychylenia płetwy sterowej.

### Wymagania stawiane autopilotom

Przy prowadzeniu statku po zadanym kursie rolą autopilota **jest utrzymywanie statku na tym kursie w sposób optymalny**. Jednak określenie kryteriów optymalnej pracy autopilota jest zagadnieniem skomplikowanym. Celem nadrzędnym jest przejście statku odcinkiem prostym - o stałym kursie, przy danej mocy, w najkrótszym czasie. Jest to kryterium ekonomiczne, niejednoznaczne z możliwie dokładnym utrzymywaniem statku na kursie.

Przebyta przez statek droga, na skutek odchylenia statku od kursu jest dłuższa, a prędkość statku ulega zmianom. Jest to spowodowane tym, że utrzymanie statku na zadanym kursie uzyskiwane jest za pomocą wychyleń steru, które istotnie wpływają na zmniejszenie prędkości statku. Odchylenia od kursu powodują bowiem wydłużenie drogi i stratę prędkości wynikającą ze strat energii na poprzeczne poruszanie się statku.

Praca autopilota zapobiega stratom prędkości statku, pozwala na optymalne prowadzenie statku po zadanym kursie.

Kolejnym zadaniem stawianym autopilotom jest **optymalna praca przy zmianach kursu dokonywanych na pełnym morzu**. Od nowoczesnych urządzeń wymagane jest wprowadzanie statku na nowy kurs szybko i bez przeregulowań.

Istotne jest przy tym utrzymanie możliwie niewielkiego wychylecia steru, aby nie powodować znacznego zmniejszenia prędkości statku podczas zmiany kursu. Wychylenie steru nie powinno zatem powodować wyraźnego wzrostu prędkości kątowej statku.

W nowoczesnych autopilotach stosowane są coraz powszechniej zaawansowane technologie pozwalające na minimalizowanie rozmiarów urządzenia oraz na zwiększanie dokładności prowadzenia statków po zadanych trajektoriach. Precyzyjne sterowanie realizowane jest się za pomocą najmniejszych ruchów płetwy sterowej, natomiast automatyczne filtry sterowania morskiego z

możliwością dostosowywania sterowania do warunków morskich umożliwiając wydajne ograniczenie zużycia paliwa.

### 3.2. Sterowność statku

Bardzo ważną cechą statku wynikającą z jego właściwości dynamicznych jest stateczność kursowa jednostki oraz jej zwrotność:

- statek stateczny kursowo to taki, który przy sterze leżącym w płaszczyźnie diametralnej, po odchyleniu się statku od kursu na skutek wpływu czynników zewnętrznych, kontynuuje ruch po nowym kursie,
- statek niestateczny kursowo, raz odchylony od kursu, z czasem zwiększa to odchylenie. Sterowanie statkiem niestatecznym kursowo jest bardzo trudne i uciążliwe.

Zwrotność statku jest cechą określającą zdolność reakcji statku na wychylenie steru. Statki zwrotne posiadają mniejszą średnicę cyrkulacji. Zwrotność i stateczność kursowa to cechy, które są sobie przeciwstawne:

- jednostki zwrotniejsze posiadają pogorszoną stateczność kursową,
- statki mające lepszą stateczność są mniej zwrotne.

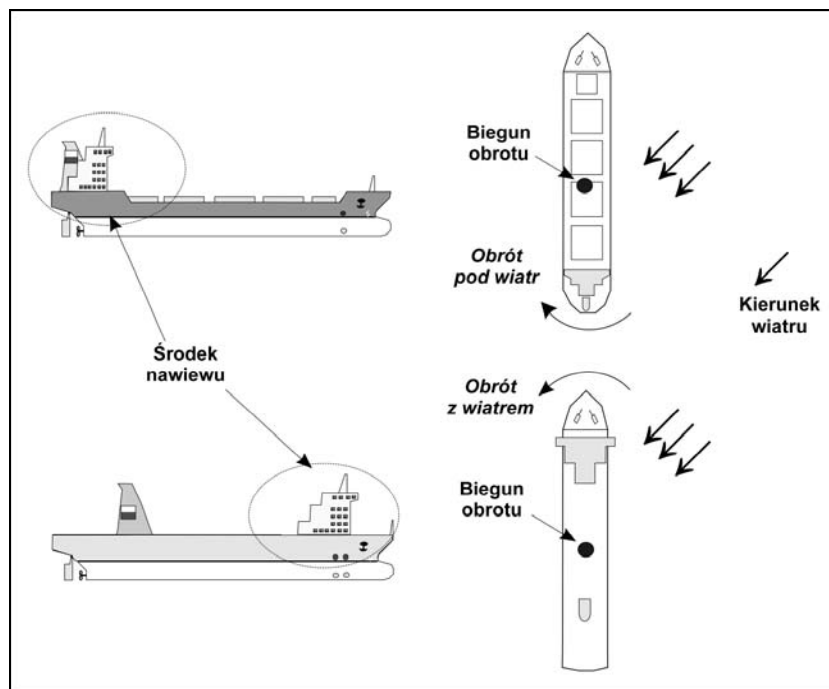
Odchylenie się statku od kursu odbywa się wskutek działania zaburzeń o charakterze ciągłym lub doraźnym.

#### 3.2.1. Zaburzenia o charakterze ciągłym

- statyczne działanie wiatru,
- przechyły statku,
- działanie śruby (efekt boczny śruby).

**Pod naporem bocznego wiatru** statek w zależności od konstrukcji (położenie nadbudówki, rozmieszczenie urządzeń pokładowe itd.) wykazuje tendencje do odchylenia się od kursu, z wiatrem (tzw. statki zawietrzne) lub pod wiatr (tzw. statki nawietrzne). Wpływ wiatru jest tym większy, im statek ma mniejszą prędkość i mniejsze zanurzenie. Stwierdzono, iż moment działający na statek na skutek oddziaływania wiatru bywa tak duży, że dla jego zrównoważenia potrzebne jest wychylenie steru nawet ponad  $10^\circ$ .

Obrót statku w wyniku działania wiatru spowodowany jest nierównomiernym rozłożeniem powierzchni nawodnej statku w stosunku do bieguna obrotu. Położenie geometrycznego środka powierzchni nawodnej statku, zwanego **środkiem nawiewu**, względem bieguna obrotu, wynika z rozkładu przede wszystkim nadbudówek, i powoduje iż statek skręca na wiatr, bądź z wiatrem.



Rys. 3.1. Kierunek obrotu statku z zależności od położenia środka nawiewu

Jak wynika z rysunku 3.1 statek którego środek nawiewu jest przesunięty do dziobu (np.: statki z nadbudówką na dziobie) ma tendencję do odchylania się od wiatru, statki takie określa się mianem statków zawietrznych.

Statek ze środkiem nawiewu oddalonym w stronę rufy, względem bieguna obrotu, będzie wykazywał tendencje do „ostrzenia na wiatr”. Statki takie nazywane są statkami nawietrznymi.

**Przechył statku** może być spowodowany nierównomiernym rozmieszczeniem ładunku, paliwa lub balastów. Wywiera taki sam wpływ na odchylanie się statku od kursu jak wiatr boczny. Gdy statek jest przechylony na jedną burzę, wtedy po tej stronie dziobu opór ośrodka wodnego jest większy (zanurzona jest większa powierzchnia burty) niż po burcie przeciwnej. Stąd, jeśli statek jest przechylony na burzę lewą (powierzchnia naporu na burcie lewej jest większa niż na prawej), będzie wykazywał tendencje do skręcania w prawo.

**Praca śruby** ma niewielki wpływ na odchylanie się statku od kursu, uwiadcza się w szczególności podczas żeglugi na akwenach o małych głębokościach lub przy nierównym ukształtowaniu dna.

### 3.2.2. Zaburzenia doraźne

- oddziaływanie fali na statek
- praca steru

**Oddziaływanie dynamiczne fali** na statek przejawia się w uderzeniach fali o burty statku, powodując doraźne odchylenia statku w obydwu kierunkach, zwane potocznie myszkowaniem statku (z ang. *yaw*). Przy różnych kątach ułożenia kadłuba statku w stosunku do fali, zmienia się amplituda oraz częstotliwość siły wymuszającej myszkowanie.

**Praca steru** również wpływa na odchylenie się statku od zadanego kursu. W celu utrzymania statku na kursie, płetwa sterowa jest cały czas w ruchu. Wychylenia te są z reguły zmienne, płetwa zmienia położenia, przechodząc z buty na burtę. Taki ruch płetwy sterowej powoduje odejścia statku od nakreślonej trajektorii.

W warunkach sztormowej pogody wyżej wymienione czynniki znacznie potęgują swoje działanie przez dodatkowe zmienne porywy wiatru i dynamiczne uderzenia fal.

### 3.3. Utrzymanie statku na zadanym kursie

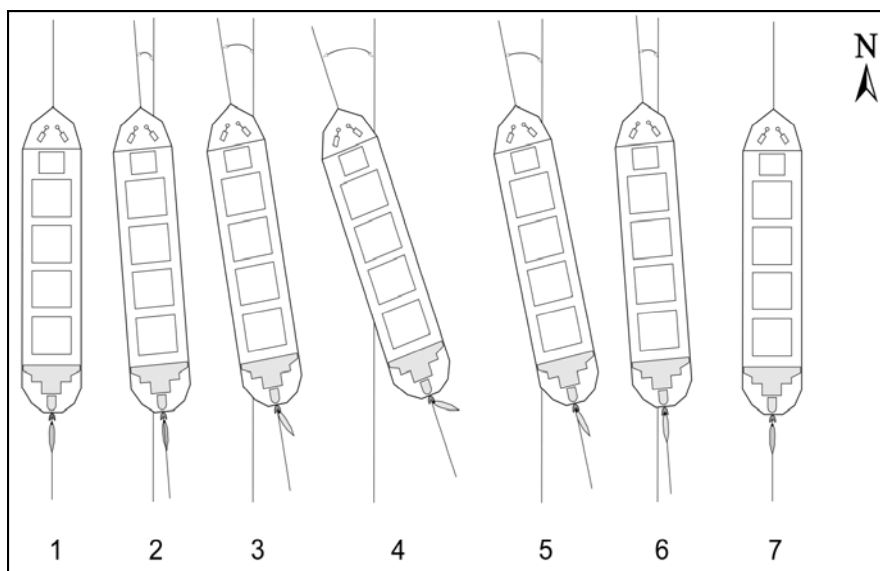
Utrzymanie statku na prostej drodze jest zagadnieniem dosyć skomplikowanym. Sternik utrzymuje statek na kursie, powodując wychylenia steru o wielkości zależne przede wszystkim od odchylenia statku od kursu, przy czym kąty wychylenia steru nie są dokładnie proporcjonalne do kątów odchylenia statku od kursu.

Ze względu na dosyć dobrą stateczność kursową statków handlowych, reagowanie na najmniejsze odchylenie statku od kursu jest niecelowe, gdyż przy małych, równomiernych zaburzeniach statek sam często wraca na kurs, bez pomocy steru.

Sternik uruchamia ster przy odchyleniach od kursu rzędu  $1^\circ$ , wychylając go mniej więcej proporcjonalnie do danego odchylenia. Przy jeszcze większych odchyleniach statku od kursu, sternik zwiększa wychylenie steru już tylko w niewielkim stopniu, przytrzymując przy tym ster dłużej w danym wychyleniu. Czyli to w tym celu, aby zbytnio nie powiększać oporu ruchu statku, który przy większych kątach wychylenia steru gwałtownie rośnie.

Doświadczony sternik musi przewidywać tendencję ruchu statku, czyli reagować nie tylko na **odchylenie statku** od kursu, ale również na **prędkość kątową** z jaką odchylenie to zwiększa się bądź zmniejsza. Im prędkość kątowa jest większa, kontruujące wychylenia steru powinny być większe oraz dłużej trwające.

Podczas sterowania powinno istnieć pewne wyprzedzenie ruchu steru w stosunku do ruchu obrotowego statku.



Rys. 3.2. Przebieg prawidłowego sterowania statkiem powodującego powrót statku na kurs

Przykładowy sposób sterowania statkiem, przedstawiono na rys. 3.2. Wartości wychylenia płetwy sterowej, oraz odchylenia statku od zadanego kursu w wyniku oddziaływania czynników zewnętrznych, są umyślnie zawyżone, w celu lepszego przedstawienia istoty sterowania statkiem. Przyjęty zadany kurs statku wynosi  $000^\circ$ .

**Położenie 1:** statek podąża wyznaczonym kursem.

**Położenie 2:** na skutek oddziaływania czynników zewnętrznych (prąd, wiatr) lub wewnętrznych (przechył boczny, praca śruby) odchyła się od wyznaczonego kursu. Ze względu na małą wartości odchylenia statku, ster nie zostaje uruchomiony.

**Położenie 3:** statek nadal odchyła się od kursu, jego prędkość kątowna obrotu wzrasta, sternik reaguje na taką sytuację wychylając ster na burtę przeciwną do obrotu.

**Położenie 4:** mimo wychylonego steru, statek nadal zwiększa kąt odchylenia od kursu, sternik równocześnie zwiększa wychylenie steru, prędkość kątowna obrotu statku spada do zera i statek zaczyna wykazywać tendencje do obrotu w drugą stronę, powracając tym samym na poprzedni kurs.

**Położenie 5:** w związku z tendencją do powrotu na kurs wychylenie steru zostaje zmniejszone.

**Położenie 6:** statek dochodzi do kursu. Mimo iż statek nie znajduje się jeszcze na kursie to płetwa sterowa powraca w położenie środkowe (*midship*).

**Położenie 7:** statek na skutek inercji samodzielnie dochodzi do wyznaczonego kursu.

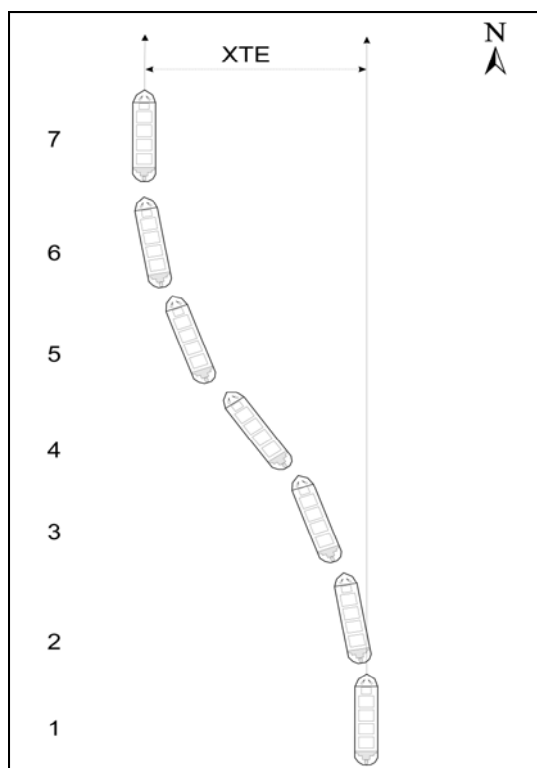
Nawet najlepszy sternik, znający właściwości manewrowe prowadzonego statku, nie zawsze jest w stanie precyzyjnie określić moment cofnięcia steru w położenie środkowe tak, aby statek płynnie doszedł do kursu. Zazwyczaj wymagane jest kontrowanie sterem, czyli wychylanie steru na burtę przeciwną w celu zredukowania prędkości kątowej obrotu statku oraz zapobieżeniu przejścia statku przez linię kursu. Taka sytuacja często powoduje myszkowanie statku, czyli oscylowanie statku wokół wartości zadanego kursu.

W podobny sposób reaguje układ automatycznej regulacji kursu jednak w zależności od doboru nastaw, reakcja na odchylenia statku od kursu będzie inna.

Utrzymanie statku na kursie nie jest równoznaczne z utrzymaniem jednostki na zadanej trajektorii. W sytuacji gdy statek poddawany jest zakłóceniom zewnętrznym, lub wewnętrznym, kurs rzeczywisty (KR) nie będzie pokrywał się z kątem drogi nad dnem (KDd). Przyczynami różnic między KR i KDd jest dryf i znos. Statek na rysunkach 3.2 i 3.3 znajdujący się w położeniu 7 powrócił na zadany kurs i podąża kursem początkowym  $000^\circ$ . Jednak pozycja jego jest przesunięta w stosunku do trajektorii, jaką podążałby z pozycji 1 w sytuacji gdyby nie oddziaływały na niego czynniki zewnętrzne. Przesunięcie to nazywane jest zejściem z trasy i oznaczane jako XTE (z ang. Cross Track Error). Istotne jest, aby w sytuacjach silnego prądu bądź wiatru kontrolować częściej pozycję statku i w razie konieczności korygować kurs na konsoli układu automatycznego sterowania. Przesunięcie to występuje także w przypadku niewłaściwego doboru nastaw regulatora autopilota, w szczególności gdy ustawiona zostanie zbyt duża strefa nieczułości, zwana również strefą myszkowania (z ang. *yaw*).

Na rysunku 3.3 przedstawiono poglądowo kolejne położenia, które zajmuje statek prowadzony automatycznie, numeracja zgodna jest ze schematem na rys. 3.2. Odchylenia statku od kursu oraz powstałe z tego powodu przesunięcie (XTE), zaznaczone na rysunku, są wartościami znacznie zawyżonymi. Sytuacja przedstawiona na rysunkach 3.2 oraz 3.3 ma na celu uświadomienie czytelnikowi pewnych problemów związanych z utrzymaniem statku na zadanym kursie oraz prowadzeniem statku po zadanej trajektorii.

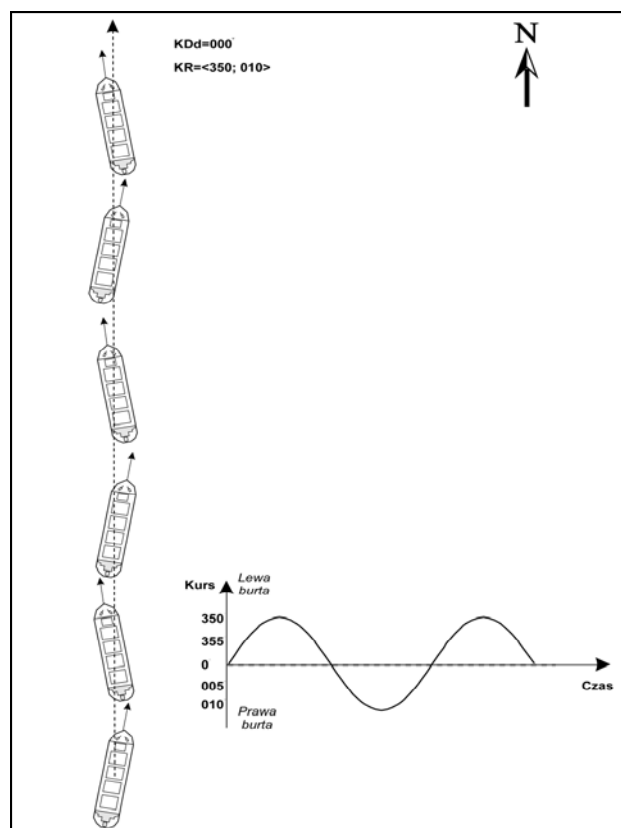
Innym zjawiskiem związanym z utrzymaniem statku na zadanej trajektorii jest myszkowanie statku (z ang. *yawing*). Myszkowanie jest to właściwość statku polegająca na schodzeniu z kursu na lewo i prawo wskutek ruchów oscylacyjnych statku wokół osi pionowej. Cecha niekorzystna utrudniająca sterowanie i powodująca wydłużenie drogi przebywanej przez statek, a więc zwiększenie zużycia paliwa i zmniejszenie prędkości podróży. Wielkość odchylen spowodowanych myszkowaniem nie jest stała, zależy od typu statku a także od stanu załadowania.



Rys. 3.3. Przesunięcie boczne (XTE) spowodowane odchyleniami statku od kursu

Na rysunku 3.4 przedstawiono obrazowo statek podlegający myszkowaniu o amplitudzie odchyłeń od kursu równej  $20^\circ$ . Kurs nastawiony na konsoli autopilota wynosi  $000^\circ$ , kurs rzeczywisty jednostki, ze względu na dwudziestostopniowe myszkowanie, jest zmienny w granicach  $<350^\circ - 010^\circ>$ . Przy założeniu harmonicznego oscylacji oraz braku zakłóceń zewnętrznych (wiatr, prąd) kreślona przez środek ciężkości statku trajektoria wyznacza kąt drogi nad dnem, który jest równy wartości kursu zadanego na autopilocie i wynosi  $000^\circ$ .

Na zamieszczonym na rysunku wykresie, linia ciągła w formie sinusoidy reprezentuje zmiany kursu żyrokompasowego w czasie (po uwzględnieniu poprawki żyro otrzymujemy kurs rzeczywisty), natomiast kąt drogi nad dnem (KDd) zaznaczono linią prostą przerywaną, która w tym przypadku pokrywa się z osią czasu.



Rys. 3.4. Wpływ myszkowania statku na trajektorię statku oraz jego KR i KDd

### 3.4. Automatyczne sterowanie statkiem

Automatyczny pilot musi wykonywać opisane wcześniej czynności w określony sposób, zależny od warunków sterowania, zawsze jednakowo, a nie w sposób przypadkowy, tak jak ma to miejsce przy sterowaniu ręcznym, które zależy od umiejętności oraz kwalifikacji sternika.

Układ automatyki, jest to zespół elementów biorących bezpośredni udział w sterowaniu automatycznym danego procesu oraz elementów pomocniczych, uporządkowanych na zasadzie ich wzajemnej współpracy, tzn. zgodnie z kierunkiem przekazywania sygnałów. Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje sterowania automatycznego:

- sterowanie w układzie otwartym
- sterowanie w układzie zamkniętym

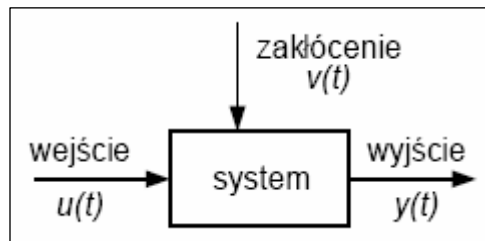
Układ otwarty – jest to układ, w którym nie ma oddziaływania wielkości wyjściowej na wielkość wejściową. Układy otwarte nie są w stanie równowżyć

zmian wewnętrznych własności obiektów sterowania oraz z zasady nie mogą sterować obiektami niestabilnymi.

Układ zamknięty – jest to układ, w którym istnieje sprzężenie zwrotne. Jednym z podstawowych układów automatyki jest układ z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Układ ten charakteryzuje się mniejszym wpływem zakłóceń działających na układ regulacji w porównaniu z układem otwartym.

### 3.4.1. Statek jako dynamiczny układ sterowania

Statek jako zamknięty, dynamiczny układ sterowania, można przedstawić schematycznie, tak jak dokonano tego na rys. 3.5. Zachowanie układu wyznaczają sygnały wejściowe  $u(t)$  oraz zakłócenia  $v(t)$ , przy czym użytkownik może wpływać tylko na wartości  $u(t)$ .



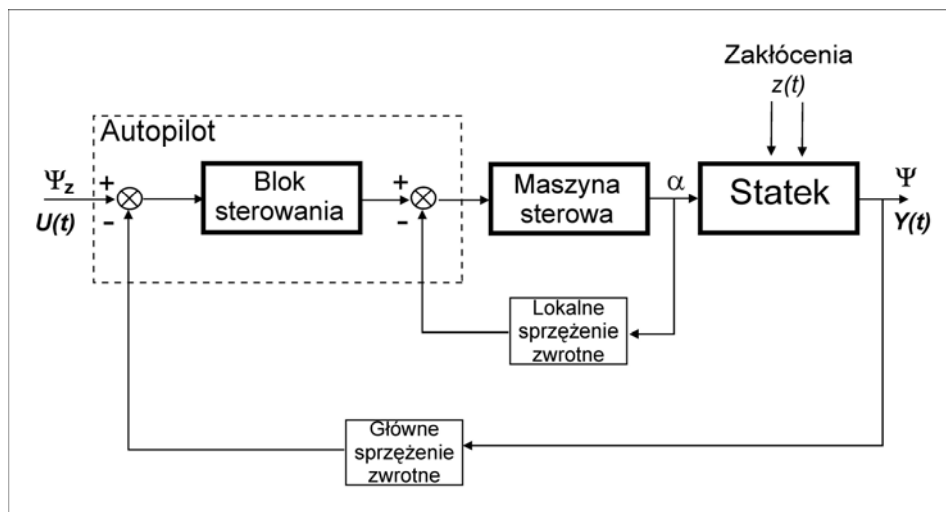
Rys. 3.5. Przykład układu dynamicznego

W celu uzyskania kontroli nad systemem (statek), należy zastosować układ regulacji, który będzie określał wpływ sygnału  $v(t)$  na sygnał wyjścia  $y(t)$  oraz na podstawie porównania sygnałów  $u(t)$  i  $y(t)$  będzie wypracowywał decyzję.

Statek jako obiekt sterowania składa się z następujących bloków:

- bloku sterowania, którym jest autopilot,
- bloku maszyny sterowej jako członu wykonawczego,
- bloku sprzężenia zwrotnego,
- bloku lokalnego sprzężenia zwrotnego, pełniącego rolę pomocniczą, zwiększając stabilność całego układu.

Schematycznie przedstawiono to na rys. 3.6.



Rys. 3.6. Schemat blokowy układu automatycznego sterowania statkiem

gdzie:

- $U(t), \Psi_z$  – kurs zadany ( $K_z$ )
- $Y(t), \Psi$  – kurs rzeczywisty (KR)
- $\alpha$  – kąt wychylenia steru

Podwójne oznaczenia przedstawiano ze względu na dostosowanie do nomenklatury automatyki.

Poniżej przedstawiono ogólną zasadę działania układu przedstawionego na rysunku 3.6.

- Na skutek działania zakłóceń lub niesymetrii hydrodynamicznej kadłuba następuje odchyłka kursowa (uchyb kursowy):

$$\Delta KR = \Theta = \Psi - \Psi_z \quad (3.1)$$

- Uchyb kursowy jest wyliczany w węźle sumującym. Na tej podstawie blok sterowania wytwarza odpowiedni sygnał sterujący zadanej wartości wychylenia steru. W członie wykonawczym następuje zamiana tego sygnału na wychylenie steru tak, aby skompensować odchyłkę kursową i doprowadzić do zgodności kursu rzeczywistego z zadany.
- Wewnętrzne sprzężenie zwrotne przekazuje sygnał rzeczywistego kąta wychylenia steru do regulatora (bloku sterowania). Spełnia przy tym funkcję pomocniczą, zwiększając stabilność układu i ogranicza ilość włączeń maszyny sterowej.
- Główne, ujemne sprzężenie zwrotne, jest realizowane przez człon pomiarowy, którym jest żyrokompas, który poprzez węzeł sumujący przekazuje do autopilota kurs rzeczywisty statku [2].

### 3.4.2. Regulacja kursu

W celu uzyskania dobrej regulacji kursu statku konieczne jest dopasowanie nastaw regulatora kursu do własności dynamicznych statku.

Regulator to urządzenie, które porównuje sygnał przychodzący z urządzenia pomiarowego sygnałem wartości zadanej i w zależności od tej różnicy działa na urządzenie wykonawcze w takim kierunku, aby tę różnicę zmniejszyć [1].

Regulatory stosowane w autopilotach morskich, są najczęściej **typu adaptacyjnego**. Regulatory adaptacyjne, to takie, których własności dynamiczne są optymalizowane przez automatyczne dostosowanie się warunków pracy obiektu. Adaptacja dotyczy tu nastrajania parametrów regulatora, zawierającego tor adaptacji, do zmiennych parametrów statku jako obiektu sterowania.

Ruch statku jest określony szeregiem wielkości, między innymi:

- kątem wychylenia steru,
- prędkością obrotu śruby,
- wiatrem,
- falowaniem.

Z teoretycznego punktu widzenia najlepiej wszystkie stawiane autopilotom wymagania spełnia regulator typu PID, tzn. regulator o równaniu:

$$\alpha = - \left( A \cdot \Theta + B \cdot \frac{d\Theta}{dt} + C \cdot \int_0^t \Theta \cdot dt \right) \quad (3.2)$$

gdzie:

- |                              |   |                                                              |
|------------------------------|---|--------------------------------------------------------------|
| $\alpha$                     | – | nastawiony kąt wychylenia steru                              |
| $A \cdot \Theta$             | – | składowa proporcjonalna - <b>P</b>                           |
| $B \cdot \frac{d\Theta}{dt}$ | – | składowa różniczkująca - <b>D</b>                            |
| $C \int_0^t \Theta \cdot dt$ | – | składowa całkująca - <b>I</b>                                |
| A, B, C                      | – | współczynniki uwzględniające wpływ poszczególnych składowych |

**Składowa proporcjonalna P** – uwzględnia odchylenia statku od kursu, przy czym we wszystkich typach autopilotów działanie członu „P” nie jest ściśle proporcjonalne do tych odchyleń. Istnieje w nim strefa martwa, dopuszczająca

myszkiwanie statku (z ang. *yaw*) w określonym kącie bez uruchamiania urządzenia sterowego.

**Składowa różniczkująca D** tego regulatora uwzględnia prędkość odchyłania się statku od kursu i powoduje odpowiednie wyprzedzenie ruchu steru w stosunku do ruchu statku. Wyrażenie  $\frac{d\Theta}{dt}$  jest prędkością kątową odchyłania się statku od kursu.

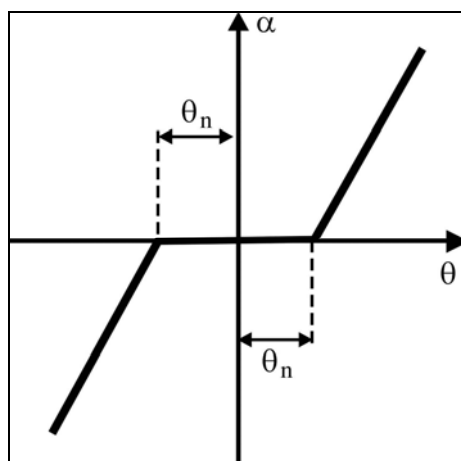
**Składowa całkująca I** – uwzględnia wielkość czynników będących przyczyną stałego odchyłania statku od kursu. Całka  $\int_0^t \Theta \cdot dt$  obliczana za określony

czas  $dt$ , jest sumą powierzchni, wyznaczonych przez krzywą kąta odchylenia statku od kursu w funkcji czasu. Jeśli suma powierzchni powyżej osi czasu (odchylenia w lewo) jest równa sumie powierzchni poniżej osi czasu (odchylenia w prawo), to całka ma wartość zero i sygnał członu „I” równa się zero.

Jeśli sumy powierzchni wynikających z odchylen w lewo i w prawo nie są sobie równe, to całka ma określoną wartość i człon „I” podaje do układu regulacyjnego sygnał, który powoduje odpowiednie stałe wychylenie steru.

Pod względem własności dynamicznych, autopilot jest regulatorem PID. Jednak w rzeczywistości transmitancja autopilota nieco odbiega od transmitancji wzorcowej regulatora PID. Różnice wynikają między innymi z:

- niedokładności zastosowanych układów różniczkujących (przybliżeń numerycznych),
- zastosowania w torze głównym autopilota elementu nieliniowego o regulowanej strefie nieczułości (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Charakterystyka elementu nieliniowego autopilota – strefa nieczułości [4]

Zastosowanie elementu liniowego pozwala na utrzymanie kursu z wymaganą dokładnością, jednocześnie powodując, iż maleje liczba wychyleń steru. Zredukowanie liczby wychyleń płetwy sterowej wpływa na zwiększenie czasu bezusterkowej pracy wszystkich urządzeń wchodzących w skład układu regulacji kursu statku.

Aby utrzymać statek na kursie nie jest konieczne wychylanie płetwy sterowej przy najmniejszym odchyleniu się statku od kursu zadanego.

Podlegająca regulacji strefa nieczułości umożliwia dobranie optymalnej wartości uchybu kursowego ( $\Theta_n$ ), przy którym kąt wychylenia steru będzie jeszcze równy 0.

### 3.5. Parametry nastawcze regulatorów, programowanie autopilotów

Najczęściej spotykane parametry regulatora podlegające regulacji to:

- **Wychylenie** (z ang. *rudder*) – powoduje zmianę wartości kąta wychylenia steru oraz czas pozostawiania płetwy sterowej w wychyleniu skrajnym, czyli zmianę współczynnika wzmocnienia, interpretacja członu P.
- **Tłumienie** – powoduje zmianę wartości współczynnika wagowego członu D.
- **Czułość** (z ang. *yaw*) – powoduje zmianę zakresu strefy martwej regulatora, związanej z myśkowaniem statku, interpretacja członu całkującego I.
- **Ograniczenie wychylenia steru** – pozwala na ograniczenie maksymalnego kąta wychylenia płetwy sterowej podczas pełnej prędkości statku w czasie automatycznej pracy urządzenia sterowego.

Dobór odpowiednich nastaw autopilota należy do oficera wachtowego. Podczas regulacji autopilota należy brać pod uwagę min.: warunki zewnętrzne, prędkość własną jednostki oraz stan załadowania. Poniżej przedstawiono ogólne zasady doboru parametrów regulacyjnych autopilota:

- Przy spokojnym morzu nastawę **czułość (yaw)** należy ustawić na wartość minimalną tak aby ograniczyć strefę martwą statku.
- Przy średnich stanach morza **strefę martwą** należy stosunkowo zwiększać, natomiast **tłumienie** ustawiać tak, aby statek oscylował możliwie blisko wyznaczonego kursu średniego.
- Przy wysokich stanach morza wartości **tłumienia** oraz **czułości** należy ustawić na poziomie minimalnym.
- W przypadku fali nadążającej, czyli fali z kierunku rufy, należy zdecydowanie zwiększyć wartość **wychylenia**.

### 3.5.1. Regulatory adaptacyjne

Integralną część członu regulacji w nowoczesnych autopilotach stanowi blok adaptacji. Blok adaptacji jest to blok sterowania automatycznego mający własności przystosowania się do zmiennych warunków pracy całego układu lub jego części, w celu utrzymania pożądanego działania lub stanu układu. W układach takich regulatory nastraja się automatycznie w zależności od zmiennych warunków pracy tak, aby spełnić określone kryterium jakości. Układy adaptacyjne wymagają ciągłego badania procesu regulacji dla uzyskania aktualnych informacji o charakterystyce obiektu i zakłóceń [4]. Zadaniem tego bloku w autopilocie okrętowym jest:

- dobór optymalnych wartości parametrów nastawialnych autopilota,
- wyprzedzenie ruchu steru w stosunku do ruchu statku,
- zmniejszenie częstotliwości i wartości kąta wychyleń steru.

Współczesne autopiloty adaptacyjne można podzielić na dwie grupy:

- autopiloty z adaptacją autonomiczną – posiadają wbudowany model odniesienia,
- autopiloty, wykorzystujące do adaptacji informację zewnętrzną.

Cechą wspólną tych grup autopilotów jest automatyczne przestrajanie niektórych parametrów układu sterowania, wpływających na jakość regulacji kursu. Różnice między nimi istnieją natomiast w metodzie formowania sygnałów oddziaływujących na parametry sterowania.

**W autonomicznych autopilotach adaptacyjnych** odpowiedź realizowana jest na podstawie analizy jakości utrzymywania statku na kursie według obserwowanych lub modelowanych sygnałów wyjściowych samego układu sterowania.

**W nieautonomicznych autopilotach adaptacyjnych** wykorzystywane są wcześniej ustalone zależności jakości sterowania od warunków zewnętrznych (zapasu wody pod stępką, prędkości, falowania). Autopilot łącząc się z odpowiednimi czujnikami (echosondą, logiem, miernikami kołysań) otrzymuje informacje o warunkach zewnętrznych, przy ich zmianie parametry sterowania przestrajają się automatycznie w celu uzyskania żądanej jakości utrzymywania statku na kursie.

Najczęściej blok adaptacji zawiera regulator PID, który zapewnia ciągłą kompensację wpływów zakłóceń środowiskowych oddziaływujących na statek. W niektórych rozwiązaniach wykorzystuje się w blokach adaptacji filtry Kalmana, pozwalające na predykcję stanu przyszłego, na podstawie bieżących parametrów obiektu. Działanie filtra opiera się na adaptacyjnym sposobie nastawiania jego wzmocnienia, przy czym predykcja stanu jest w każdym momencie wyliczana jako średnia wagowa pomiędzy wartością ekstrapolowaną w kroku poprzednim a wartością obserwowaną – bieżącą.

Filtr dokonuje obróbki następujących parametrów:

- odchyłka kursu,
- pochodna odchyłki kursu, czyli prędkość kątowna obrotu statku,
- kąt przechyłu.

Odpowiedzią filtra są parametry nastawne w bloku regulacji.

### 3.5.2. Tendencje rozwojowe autopilotów

W filtrach Kalmana używanych obecnie w autopilotach stosowane są modele dynamiki kadłuba statku i zakłóceń oparte o równania matematyczne, będące pewnymi uproszczeniami dynamiki rzeczywistej obiektu.

W nowoczesnym autopilotach stosowane się regulatory neuronowe oraz algorytmy genetyczne, służące polepszeniu procesu regulacji a co za tym idzie całego procesu sterowania statkiem.

Wyraźny jest także rozwój autopilotów umożliwiających prowadzenie statku po akwenach ograniczonych po wcześniej wyznaczonej trasie. Aby zapewnić takie sterowanie, układ regulatora musi zapewnić stałą prędkość kątową na zwrocie (ROT – z ang. *rate of turn*) lub stały promień zwrotu (z ang. *radius*), uwzględniając przy tym zmiany prędkości liniowej jednostki, wpływającą wydatnie na zmianę zdolności manewrowych statku.

Również coraz powszechniej spotykanym rozwiązaniem jest sprzęganie autopilota z innymi urządzeniami nawigacyjnymi, tworząc systemy nawigacji zintegrowanej. Autopilot może być połączony z następującymi urządzeniami:

- echosonda,
- log,
- odbiornik systemu pozycjonowania, np.: GPS.

#### Echosonda

Doprowadzenie sygnału z echosondy jest istotne szczególnie na wodach płytkich, gdzie głębokość wody pod stępką ma wpływ na czas reakcji statku na wychylenie steru. W takich przypadkach uwzględnienie sygnału z echosondy powoduje zmianę sygnału zadanego wychylenia płetwy sterowej, w celu utrzymania odpowiedniej reakcji statku.

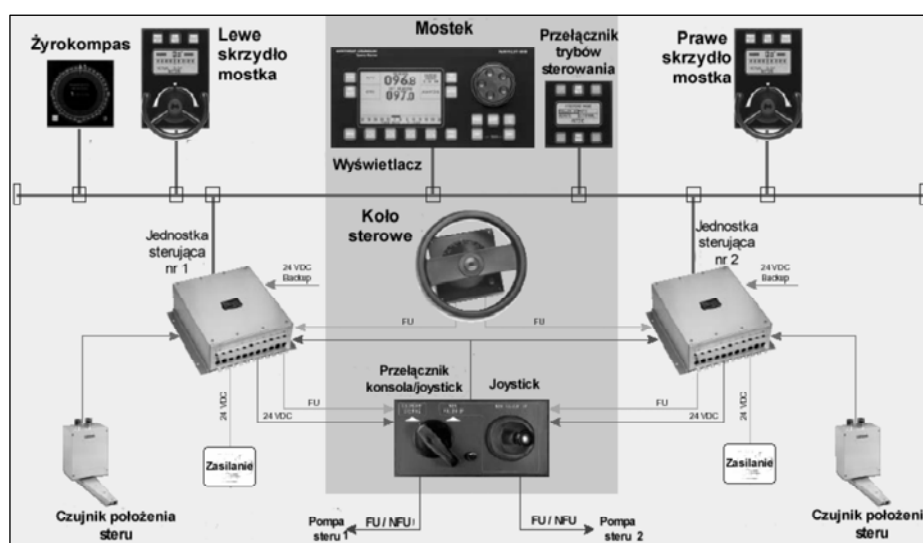
#### Log

Uwzględnienie sygnału z logu dwuskładnikowego, czyli podającego prędkość tak wzdłużną jak i poprzeczną umożliwia dokonanie korekty kąta dryfu. Kąt pomiędzy wektorem prędkości ponad dnem a wektorem prędkości w stosunku do wody jest obliczany i dodany bądź odjęty od kursu rzeczywistego (żyrokompasowego). W ten sposób możliwa staje się ocena właściwego kursu względem dna (kąta drogi po wodzie).

#### Odbiornik systemu pozycjonowania

Sprzęgnięcie autopilota z odbiornikiem systemu pozycjonowania satelitarnego GPS otwiera nowe możliwości w dziedzinie automatycznego prowadzenia statku. Dane pochodzące z odbiornika GPS umożliwiają wyznaczenie kąta drogi po wodzie oraz prędkości statku względem dna, tak wzdłużnej jak i poprzecznej. Ciągła kontrola pozycji oraz możliwość zaplanowania trasy w odbiorniku GPS pozwala na precyzyjne sterowanie statkiem a trybie automatycznym.

Na rys. 3.10 przedstawiono schematycznie elementy składowe wchodzące w skład autopilota firmy SperryMarine, będącego jednocześnie częścią układu automatycznego sterowania.



Rys. 3.10. Schemat blokowy systemu automatycznego sterowania, na przykładzie systemu SteerMaster firmy Sperry Marine [6]

### 3.6. Regulacje prawne dotyczące autopilotów

W świetle międzynarodowej Konwencji SOLAS, wszystkie statki o pojemności brutto powyżej 10 tys ton powinny posiadać system kontroli kursu lub drogi, lub inne urządzenie do automatycznej kontroli i utrzymywania kursu lub drogi.

Międzynarodowe normy dotyczące autopilotów według IMO, zawarte zostały w Rezolucji A.342, zatwierdzonej w dniu 12.11.1975 r. Przepisy krajowe, uwzględniające regulacje międzynarodowe, odnośnie autopilotów zebrane są w „Przepisach Polskiego Rejestru Statków dotyczących urządzeń elektrycznych i automatyki”. Regulacje PRS weszły w życie z dniem 01.07.2002 r.

Z przepisów polskich w zakresie wyposażenia statków wynika, iż na statkach mogą być instalowane urządzenia i wyposażenie, jeżeli odpowiadają przepisom technicznym Polskiego Rejestru Statków. PRS jako członek stowarzyszo-

ny Międzynarodowego Stowarzyszenia Instytucji Klasyfikacyjnych (IACS) przyjął w swoich przepisach klasyfikacji i budowy statków oraz przewidział w systemie nadzoru takie same procedury certyfikacji wyrobów, jak pozostali członkowie IACS. Ponadto przepisy PRS uwzględniają wymagania takich aktów prawnych jak: konwencje, rezolucje i okólniki IMO oraz normy międzynarodowe.

Poniżej pokrótce zostaną przedstawione wybrane wymagania dotyczące autopilotów według PRS.

- Autopilot powinien zapewniać utrzymanie statku na wyznaczonym kursie z dokładnością  $\pm 1^\circ$  przy prędkości statku nie mniejszej niż 6 węzłów.
- Maksymalna amplituda myśzkowania na wyznaczonym kursie nie powinna przekraczać:
  - $1^\circ$  przy stanie morza do 3 stopni w skali Beauforta,
  - $4^\circ$  przy stanie morza do 5 stopni, przy kącie natarcia fali  $45^\circ$  z burty.
- Autopilot powinien być wyposażony w urządzenie uniemożliwiające wyłożenie steru więcej niż  $35^\circ$  na burzę.
- Należy przewidzieć urządzenie do ręcznej regulacji czułości nadążania autopilota za przełożeniem steru w zależności od warunków żeglugi, a także możliwość regulacji autopilota, w zależności od właściwości manewrowych statku.
- Należy przewidzieć wskaźnik informujący o zadaniu bądź osiągnięciu maksymalnego wychylenia steru w trakcie sterowania automatycznego.
- Na pulpicie autopilota powinno znajdować się urządzenie do ręcznego sterowania maszyną sterową.
- Układ sterowania ręcznego powinien być prosty, pewny i powinien pracować bez udziału skomplikowanych elementów stosowanych przy sterowaniu automatycznym.
- Układ sterowania autopilota powinien być całkowicie samosynchronizujący się i nie powinien wymagać jakiegokolwiek regulacji przy przełączaniu trybów sterowania.
- Przejście ze sterowania automatycznego na ręczne powinno odbywać się przy pomocy jednej manipulacji, w czasie nie dłuższym niż 3 sekundy i przy każdym położeniu steru.
- Układ i konstrukcja autopilota powinny być takie, aby w przypadku jakiegokolwiek uszkodzenia układu sterowania automatycznego zapewniona była możliwość ręcznego sterowania maszynką sterową z dowolnego stanowiska sterowego.
- Na pulpicie sterowania autopilota należy zainstalować: powtarzacz kursu żyrokompasowego lub magnetycznego, wskaźnik zadanego oraz rze-

czywistego położenia steru, elementy włączania zasilania całego układu sterowania oraz silników elektrycznych napędzających ster, przełączniki czułości i rodzajów sterowania oraz inne eksploatacyjne elementy sterowania i regulacji.

- W autopilocie należy przewidzieć urządzenie, które przy automatycznym sterowaniu zapewnia możliwość ręcznej zmiany kursu statku na dowolny inny kurs, w granicach co najmniej 15° od kursu początkowego, bez konieczności przełączania autopilota na sterowanie ręczne.
- W zestawie autopilota zaleca się przewidzieć dwa wynośże stanowiska sterowania ręcznego, zapewniające przy automatycznym sterowaniu możliwość nagłej zmiany kursu statku. Wielkość nagłej zmiany kursu w dowolną stronę powinna być możliwa aż do pełnej cyrkulacji. Wynośże stanowiska sterowania ręcznego należy tak rozwiązać, aby po ustawieniu rękojeści w pozycji neutralnej (zero) zapewniony był powrót statku na poprzednio zadany kurs i dalsze działanie sterowania automatycznego.

Dodatkowo, autopilot adaptacyjny, powinien spełniać następujące wymogi:

- Powinien zapewnić, bez udziału osoby sterującej, optymalną pracę steru w zróżnicowanych warunkach żeglugowych, oraz przy zmianach rozkładu ładunku, prędkości i przegłębienia statku.
- Powinien umożliwić jednoczesną i równoległą pracę dwóch silników napędu steru w trudnych warunkach żeglugowych i pogodowych.

### 3.7. Skróty oraz funkcje występujące na konsolach autopilotów

W rozdziale przedstawiono najczęściej występujące skróty oraz funkcje spotykane w układach automatycznego sterowania statkiem, odnoszące się jedynie do pracy układu sterowania. Funkcje dodatkowe wynikające ze sprzężenia autopilota z urządzeniami zewnętrznymi takimi jak echosonda, systemy pozycjonowania, układy nawigacyjne, zostały celowo pominięte.

| Skrót  | Rozwinięcie angielskie          | Znaczenie                                                   |
|--------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| COG    | course over ground              | Kąt drogi nad dnem                                          |
| Crs    | course                          | Kurs rzeczywisty (z żyrokompasu)                            |
| Dim    | dimmer                          | Podświetlenie konsoli                                       |
| HDG    | heading                         | Bieżący kurs rzeczywisty                                    |
| CC     | compass course, magnetic course | Kurs magnetyczny (z kompasu magnetycznego)                  |
| Radius | -                               | Ustawianie maksymalnego promienia zwrotu. Im promień skrętu |

|                                  |                   |                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  |                   | będzie większy tym manewr będzie przeprowadzony łagodniej przy mniejszych wychyleniach płetwy sterowej                                                                  |
| ROT                              | rate of turn      | Ustawianie maksymalnej prędkości kątowej wykonywania zwrotu przez statek w trybie sterowania automatycznego                                                             |
| Rudder Angle                     | -                 | Wartość wychylenia płetwy sterowej podawana w stopniach                                                                                                                 |
| Rudder limit                     | -                 | Ograniczenie wychylenia płetwy sterowej poprzez zadeklarowanie maksymalnej wartości wychylenia (w stopniach)                                                            |
| Set course                       | -                 | Wartość zadana kursu                                                                                                                                                    |
| SOG                              | speed over ground | Prędkość chwilowa nad dnem                                                                                                                                              |
| Steering mode                    | -                 | Tryb pracy urządzenia sterowego:                                                                                                                                        |
| Steering mode auto               | -                 | - Tryb automatyczny                                                                                                                                                     |
| Steering mode manual             | -                 | - Tryb ręczny                                                                                                                                                           |
| Steering mode – port wing        | -                 | - Tryb sterowania z lewego skrzydła mostka                                                                                                                              |
| Steering mode – starboard wing   | -                 | - Tryb sterowania z prawego skrzydła mostka                                                                                                                             |
| Steering mode – joystick (dodge) | -                 | - Tryb sterowania przy pomocy joystick'a polegające na chwilowym wychylaniu płetwy sterowej przez operatora, w trakcie automatycznego trybu pracy (wymijanie, omijanie) |
| SOW                              | speed over water  | Prędkość po wodzie                                                                                                                                                      |
| Turn                             | -                 | Funkcja umożliwiająca wykonanie zaprogramowanego manewru np.: zwrot o 180°, zwrot o 360° i inne.                                                                        |
| Trim                             | -                 | Ustawianie stałego wychylenia płetwy sterowej                                                                                                                           |
| Rudder gain                      | -                 | Ustawienia współczynnika wzmocnienia wychylenia płetwy sterowej                                                                                                         |
| Yaw                              | -                 | Ustawianie strefy myśkowania statku                                                                                                                                     |

## Alarmy

| Rodzaj alarmu                              | – | Opis alarmu                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Deviation alarm<br>lub<br>Off-course alarm | – | alarm generowany w przypadku, gdy różnica pomiędzy kursem rzeczywistym statku a kursem zadany przekroczy ustawioną wartość graniczną (np.: 5°)                                                 |
| Missing heading data                       | – | alarm generowany w przypadku utraty informacji o kursie (kompas magnetyczny lub żyrokompas)                                                                                                    |
| Power failure                              | – | alarm generowany w przypadku awarii napędu płetwy sterowej                                                                                                                                     |
| Watch alarm                                | – | alarm generowany z określoną częstotliwością w trybie pracy automatycznym, zmuszający operatora do podejścia do konsoli, wyłączenia go, przez co zapewniona jest ciągła kontroli pracy systemu |

## Literatura

1. Chotkowski W., *Podstawy automatyki*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
2. Krajczyński E., *Urządzenia nawigacji technicznej*. Wydawnictwa Uczelniane WSM Gdynia, Gdynia, 1995.
3. Nowicki A., *Wiedza o manewrowaniu statkami morskimi*. Trademar, Gdynia 1999.
4. Perycz S., *Podstawy automatyki*. Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1980.
5. *Przepisy PRS*, Wydawnictwa PRS, Gdańsk 2003.
6. Wyszowski S., *Autopiloty okrętowe*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1982.
7. Serwis internetowy: [www.sperrymarine.com](http://www.sperrymarine.com)