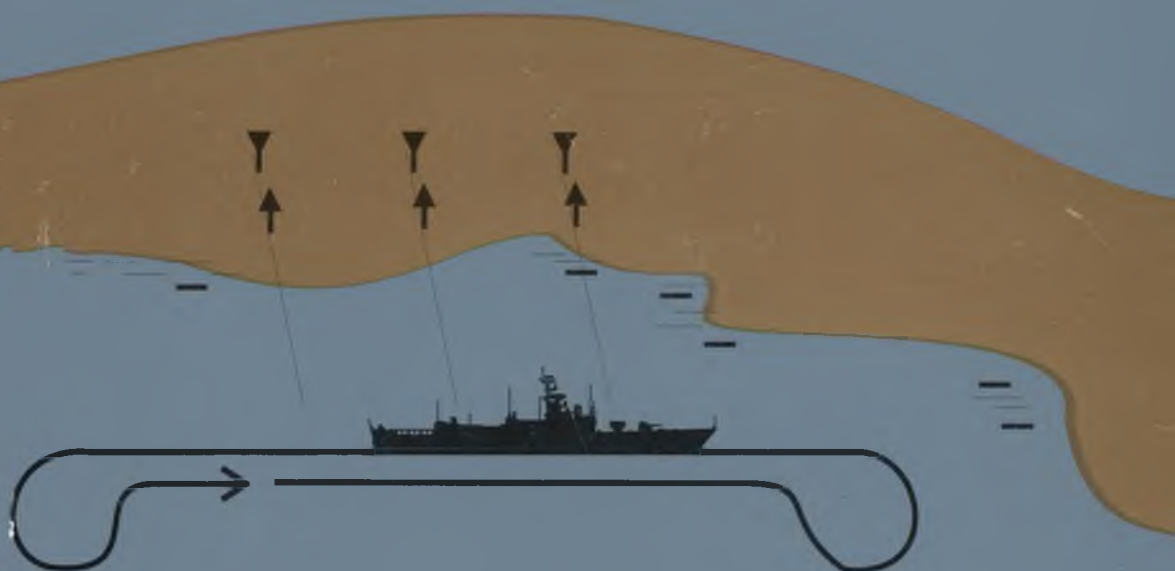


ANDRZEJ FELSKI

# POMIAR PRĘDKOŚCI OKRĘTU

METODY I URZĄDZENIA



GDYNIA 1998



**AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ**

**im. Bohaterów Westerplatte**

---

**AMW Wewn. 968/98**

**Andrzej FELSKI**

**POMIAR PRĘDKOŚCI  
OKRĘTU**

**METODY I URZĄDZENIA**

**Gdynia 1998**

527

531.112.1

53.087

629.12.053.2

NAWIGACJA, OKRĘT, PRĘDKOŚĆ  
POMIAR, URZĄDZENIEAMW  
pol.

FELSKI A.: **Pomiar prędkości okrętu. Metody i urządzenia.** Gdynia: AMW 1998, 126 s., 31 rys., 4 tabl.

Książka zawiera materiał obejmujący szeroko problematykę metod pomiaru prędkości okrętu, budowy, użytkowania i weryfikacji urządzeń stosowanych do tego celu a także określania błędów logów. Szczegółowo omówiono w niej budowę całej gamy urządzeń, które mogą służyć do pomiaru prędkości okrętu - powszechnie używanych logów i innych systemów oraz urządzeń nawigacyjnych przydatnych do tego celu, w tym informacje o rozwiązaniach stosowanych w przeszłości.

Zamiarem autora było przygotowanie książki dla studentów wyższych uczelni o kierunku nawigacyjnym, jednak z pewnością będzie ona również przydatna oficerom wachtowym w ich praktycznej działalności.

A.F. 16/98

## Recenzenci:

prof. dr hab. kpt. ż. w. Daniel DUDA  
kmdr dr inż. Wacław MORGAŚ  
kmdr dr inż. Andrzej HYDZIK

Opracowanie redakcyjne:  
Aleksandra WALENCIK

ISBN 83-87280-22-4

---

Wydrukowano w formacie B-5 na papierze offsetowym kl. III, 90 g.  
Druk rozpoczęto w grudniu 1998 r. Druk ukończono w grudniu 1998 r.  
Druk AMW. Zam. nr 449/98.

# SPIS TREŚCI

|                                                                             | Strona |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>INDEKS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ</b>                                            | 5      |
| <b>WSTĘP</b>                                                                | 9      |
| <b>Rozdział 1. PRĘDKOŚĆ OKRĘTU</b>                                          | 13     |
| <b>Rozdział 2. BUDOWA I CHARAKTERYSTYKA LOGÓW</b>                           | 18     |
| 2.1. Klasyfikacja logów okrętowych                                          | 18     |
| 2.2. Log hydromechaniczny                                                   | 21     |
| 2.3. Log hydrodynamiczny                                                    | 25     |
| 2.4. Log indukcyjny                                                         | 40     |
| 2.5. Log geoelektryczny                                                     | 47     |
| 2.6. Log korelacyjny                                                        | 48     |
| 2.7. Log hydroakustyczny                                                    | 53     |
| 2.8. Radiowy log dopplerowski                                               | 64     |
| 2.9. Urządzenia inercyjne                                                   | 67     |
| <b>Rozdział 3. ZASADY REGULACJI LOGÓW</b>                                   | 75     |
| <b>Rozdział 4. POMIARY PRĘDKOŚCI RZECZYWISTEJ OKRĘTU</b>                    | 83     |
| 4.1. Określenie prędkości na mili pomiarowej                                | 85     |
| 4.2. Określenie niezbędnej długości przebiegu                               | 93     |
| 4.3. Pomiar prędkości i poprawki logu radarem                               | 97     |
| 4.4. Wykorzystanie systemów radionawigacyjnych                              | 103    |
| 4.5. Wykorzystanie systemu GPS do pomiarów prędkości                        | 110    |
| 4.6. Analiza czynników wpływających na dokładność pomiarów                  | 116    |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>                                                         | 122    |
| <b>Załącznik. WYMAGANIA TECHNICZNE I KONSTRUKCYJNE DLA LOGÓW OKRĘTOWYCH</b> | 123    |



## INDEKS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

|                    |                                                                           |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $a, b, c, d \dots$ | - współczynniki równania błędów                                           |
| ARPA               | - radar z automatycznym śledzeniem                                        |
| $B$                | - indukcja magnetyczna                                                    |
| $C$                | - prędkość dźwięku w wodzie                                               |
| $D_{Pi}$           | - odległość do obiektu z $i$ -tego punktu pomiarowego                     |
| DGPS               | - system GPS w wersji różnicowej                                          |
| $E$                | - wektor siły elektromotorycznej                                          |
| $f$                | - częstotliwość fali wysyłanej przez nadajnik                             |
| $f_0$              | - częstotliwość dopplerowska                                              |
| $g$                | - przyspieszenie ziemskie                                                 |
| GPS                | - satelitarny system radionawigacyjny                                     |
| $h$                | - wysokość słupa wody                                                     |
| $h$                | - wysokość ponad elipsoidę odniesienia                                    |
| $H$                | - głębokość morza                                                         |
| IMO                | - International Maritime Organization (Międzynarodowa Organizacja Morska) |
| $k_1, k_2$         | - współczynniki proporcjonalności                                         |
| $K$                | - współczynnik korekcyjny logu                                            |
| $l$                | - długość przewodnika                                                     |
| $M$                | - ilość okresów fali w przedziale całkowania                              |
| $N$                | - liczba obrotów stożka podstawy czasu w układzie zliczenia drogi         |

|          |                                                                                                             |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $n$      | - liczba obrotów kółka przekładni czarnej w układzie zliczenia drogi                                        |
| $OL_i$   | - i-ty odczyt logu                                                                                          |
| $P_C$    | - ciśnienie całkowite wody                                                                                  |
| $P_D$    | - ciśnienie dynamiczne wody                                                                                 |
| $P_S$    | - ciśnienie statyczne wody                                                                                  |
| PRS      | - Polski Rejestr Statków                                                                                    |
| $R$      | - promień koła wykreślonego na powierzchni bocznej stożka przez kółko przekładni w układzie zliczenia drogi |
| $ROL$    | - różnica odczytów logu                                                                                     |
| $RZO_i$  | - i-te położenie ruchomego znacznika odległości na ekranie radaru                                           |
| $r$      | - promień kółka przekładni zliczenia drogi                                                                  |
| $S$      | - droga                                                                                                     |
| $t$      | - czas                                                                                                      |
| $t_L$    | - czas przejścia odcinka kontrolnego ROL                                                                    |
| $T$      | - zanurzenie okrętu                                                                                         |
| $T$      | - okres fali                                                                                                |
| $U$      | - napięcie elektryczne                                                                                      |
| $V$      | - wektor prędkości okrętu (strumienia wody względem okrętu)                                                 |
| $V_L$    | - prędkości według wskazań logu                                                                             |
| $V_k$    | - prędkość rzeczywista okrętu                                                                               |
| $V_0$    | - rzut prędkości nadajnika na prostą łączącą źródło dźwięku i odbiornik                                     |
| $V_p$    | - rzut prędkości odbiornika na prostą łączącą źródło dźwięku i odbiornik                                    |
| $\alpha$ | - odchylenie osi wiązki antenowej od płaszczyzny horyzontu                                                  |



|                |                                                                                  |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_i$     | - kąt kursowy na i-ty punkt orientacyjny w momencie pomiaru końcowych odległości |
| $\gamma$       | - ciężar właściwy wody                                                           |
| $\Delta D_i$   | - poprawka odległości do i-tego punktu pomiaru odległości radarem                |
| $\Delta F$     | - błąd względny pomiaru częstotliwości dopplerowskiej                            |
| $\Delta f$     | - dopplerowska różnica częstotliwości                                            |
| $\Delta \log$  | - poprawka logu                                                                  |
| $\eta$         | - kąt odejścia od zadanego kursu                                                 |
| $\Theta$       | - rozwartość charakterystyki antenowej przetwornika                              |
| $\vartheta$    | - kąt przechyłów bocznych okrętu                                                 |
| $\lambda$      | - długość geograficzna                                                           |
| $\sigma_C$     | - błąd średni nakłucia cyrkla przy pomiarze długości z mapy                      |
| $\sigma_{GR}$  | - błąd średni naniesienia pozycji na mapę                                        |
| $\sigma_L$     | - błąd średni poprawki logu                                                      |
| $\sigma_{ROL}$ | - błąd średni różnicy odczytów logu                                              |
| $\sigma_S$     | - błąd średni długości odcinka pomiarowego                                       |
| $\sigma_t$     | - błąd w określeniu czasu przejścia odcinka pomiarowego                          |
| $\sigma_V$     | - błąd logu                                                                      |
| $\sigma_v$     | - błąd średni określenia prędkości okrętu                                        |
| $\tau$         | - czas opóźnienia                                                                |
| $\Phi$         | - wektor pola magnetycznego                                                      |
| $\varphi$      | - szerokość geograficzna                                                         |
| $\omega$       | - częstotliwość napięcia wzbudzającego                                           |



## WSTĘP

We współczesnej, zautomatyzowanej i zintegrowanej nawigacji opartej na systemach satelitarnych oraz komputerach, wielu nawigatorów przypisuje mniejsze znaczenie do precyzyjnego zliczania przebytej drogi niż przed erą GPS. Wynika to z niemalże nieograniczonej możliwości określenia pozycji obserwowanej – w dowolnym miejscu i czasie, zazwyczaj z wystarczającą dokładnością dla celów typowej żeglugi. W efekcie obserwujemy niewątpliwie niewłaściwe zjawisko lekceważenia zliczania drogi, a w związku z tym praktyk nawigator nie odczuwa takiej potrzeby określania pozycji zliczonej jak w przeszłości. Ponadto, wiele urządzeń mimo wszystko przeprowadza w różnym zakresie zliczenie za nawigatora.

Wbrew pozorom, znaczenie precyzyjnego pomiaru prędkości i przebytej drogi nie zmalało. Wręcz przeciwnie - wzrosło, bowiem w zintegrowanych systemach nawigacyjnych prędkość jest traktowana jako jedna z wielu istotnych wielkości pomiarowych. Przy tym wymagania wobec pomiarów tej wielkości są większe niż w przeszłości. Oczekuje się bowiem nie tylko zwiększenia dokładności pomiarów, ale również częstszego ich przekazywania do innych urządzeń nawigacyjnych i systemów. Ponadto, w przeszłości prędkość traktowana była jako wielkość skalarna, przy założeniu, iż mierzona prędkość pokrywa się z kursem okrętu. Współcześnie niezbędna jest znajomość całego wektora ruchu, zazwyczaj zobrazowanego jako dwie składowe - wzdłużna i poprzeczna - ruchu okrętu w płaszczyźnie horyzontu.

Stwierdzenia o małej roli pomiarów prędkości są więc fałszywe i być może wynikają z faktu, iż nowymi metodami łatwiej jest uzyskać informację o teźszej prędkości. Jeszcze sto lat temu bowiem pomiar prędkości okrętu wymagał wielu zabiegów ze strony nawigatora, gdyż nie zawsze dysponował on odpowiednim urządzeniem pomiarowym. W przypadku, gdy było ono dostępne, niezdadne było zastosowanie wielu zabiegów aby spowodować, by stało się zdane do

pomiarów. Obecnie przeciętny okręt dysponuje niekiedy nawet kilkoma urządzeniami przeznaczonymi do pomiaru prędkości, a cały wysiłek nawigatora sprowadza się jedynie do odczytania wskazań. Podsumowując można zatem stwierdzić, że obecnie nie wykonuje się wielu zadań ręcznie, a człowiek niekiedy nie uświadamia sobie dokładnie, jakie zadania realizują automaty zastępujące go w wielu czynnościach.

Jednak współcześnie, tak jak w przeszłości, do realizacji celów nawigacji niezbędna jest znajomość prędkości okrętu. W rzeczywistości proces nawigacji realizowany przez automaty nie odbiega zbytnio od tego, co wykonywano ręcznie. Nadal więc istnieje potrzeba uwzględniania (oprócz pozycji obserwowanej) ruchu, a więc określania jego kierunku i prędkości. Obecnie jednak urządzenie służące do tego celu, popularnie zwane logiem, jest zazwyczaj połączone elektrycznie z komputerem i prędkość jest uwzględniana automatycznie. Ponadto – nie zawsze funkcję pomiaru prędkości realizują takie urządzenia, jakie były znane i stosowane wcześniej. Obserwujemy bowiem proces zastępowania znanych wcześniej przyrządów do pomiaru prędkości nowymi - bazującymi na wykorzystaniu fal radiowych emitowanych bardzo często przez sztuczne satelity Ziemi. Wówczas pojawia się nowy problem, bowiem urządzenia do pomiaru prędkości mogą dokonywać tych pomiarów względem wody lub dna. Często upraszcza to problem zliczenia drogi, jednak w wielu przypadkach może go skomplikować.

Coraz szerzej stosowane bywają również urządzenia nawigacji inercyjnej, które znacznie odbiegają od popularnych wyobrażeń o logach. W pierwszym rzędzie dokonują one pomiaru prędkości okrętu wzdłuż południka i równoleżnika, choć pozornie bez jakiegokolwiek kontaktu z Ziemią. O ile bowiem starsze logi dokonywały pomiarów wybranych wielkości fizycznych wody opływającej kadłub okrętu lub przeróżnych fal emitowanych do otaczającego okręt środowiska, to funkcjonowanie urządzeń nawigacji inercyjnej opiera się na pomiarze przyspieszeń, z jakimi okręt oddziałuje na elementy pomiarowe takiego systemu.

Zatem nawigator na okręcie nadal oczekuje precyzyjnej informacji o prędkości okrętu, jakkolwiek hierarchia jego potrzeb jest inna niż kiedyś. Współcześnie informacja taka przede wszystkim niezbędna jest nawigatorowi do podejmowania właściwych decyzji związanych z manewrowaniem jednostką. Szczególnie istotną informacją o prędkości staje się w kontekście dążenia do unikania zderzeń oraz manewrowania względem innych obiektów pływających. Bez niej (również informacji o kursie) nie mogą prawidłowo funkcjonować pewne urządzenia: ARPA lub radar o zobrazowaniu rzeczywistym. Ponadto okręty nie mogą w pełni wykorzystać własności torped i rakiet, bowiem zwykle użycie tego uzbrojenia wiąże się z wyborem punktu celowania, który wynika z rozwiązania trójkąta wektorowego. Jednym z elementów tego trójkąta jest wektor prędkości nosiciela uzbrojenia.

Powyższe nie deprecjonuje znaczenia informacji o prędkości dla prowadzenia precyzyjnej nawigacji, o czym wspomniano już wcześniej.

Zamiarem autora niniejszej pracy jest przedstawienie - z punktu widzenia nawigatora okrętowego - problematyki metod pomiaru prędkości okrętu i stosowanych do tego urządzeń. Dlatego zawiera ona omówienie metod określania prędkości a także zasad działania i charakterystykę błędów podstawowych typów logów. Prezentując powyższe zwrócono też uwagę na metody określania błędów logów, co zdaje się być jednym z ważniejszych zadań dla nawigatora na okręcie. W związku z tym przedstawiono rzadko omawiane w literaturze warianty wykorzystania do tych celów nowoczesnych urządzeń nawigacyjnych - systemów radionawigacyjnych oraz radarów (w tym radarów z automatycznym śledzeniem echa).

W dobie burzliwego rozwoju systemów satelitarnych nie można było pominąć problematyki wykorzystania tego rodzaju urządzeń oraz niedogodności i błędów, jakie są z tym związane.

Książka jest przeznaczona przede wszystkim dla studentów Wydziału Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego AMW studiujących na kierunkach eksploatacja urządzeń pokładowych oraz pomiary hydrograficzne i oznakowanie

nawigacyjne. Może okazać się również przydatna w pracy zawodowej oficerów pokładowych okrętów MW oraz statków handlowych.



## Rozdział 1

### PRĘDKOŚĆ OKRĘTU

Prędkość jest wielkością fizyczną o charakterze wektorowym określoną przez pochodną położenia obiektu względem czasu i jest jedną z podstawowych wielkości występujących w nawigacji.

Pojęcie *wielkość wektorowa* oznacza, iż do pełnego opisu tejże wielkości należy podać więcej niż jedną liczbę, co dowodzi jej wielowymiarowości. Oznaczenie prędkości wymaga znajomości nie tylko wartości prędkości, lecz również kierunku przemieszczania się obiektu. Ponieważ obiekt nawigacji morskiej, czyli okręt, porusza się po powierzchni morza - wektor prędkości będzie leżał w płaszczyźnie horyzontu. Możemy więc określić go za pomocą kierunku oraz długości wektora lub dwóch składowych tego wektora leżących w dwóch osiach układu kartezjańskiego. Jednak w wielu przypadkach, na przykład okrętu podwodnego, nie będzie to stanowić pełnej informacji, bowiem istotna będzie również trzecia współrzędna układu współrzędnych kartezjańskich (pionowa) lub dodatkowa dana o kącie odchylenia wektora od płaszczyzny horyzontalnej.

Zasadniczym sposobem określenia prędkości jest obliczenie pochodnej współrzędnych w czasie czyli zmiany współrzędnych w czasie:

$$\bar{V} = \frac{\partial \bar{r}}{\partial t} \quad (1.1)$$

gdzie:

$\bar{V}$  – prędkość okrętu;

$\bar{r}$  – współrzędna;

$t$  – czas.

W powyższym równaniu należy zwrócić uwagę na fakt, że prędkość oraz współrzędna są wielkościami wektorowymi.

Teoretycznie prosty sposób określania prędkości, jakim jest obliczenie pochodnej współrzędnych względem czasu, nie zawsze może być zrealizowany z przyczyn technicznych. Ponadto – w praktyce oznacza prędkość chwilową, która na wzburzonym morzu może zmieniać się w znacznym stopniu. Tymczasem bardzo często informacja o prędkości jest niezbędna do obliczenia przebytej przez okręt drogi, co łatwiej jest wykonać posługując się pojęciem prędkości średniej w określonym przedziale czasu. Prędkość średnią można ustalić obliczając w pewnym przedziale czasu średnią wartość z prędkości chwilowych. Taka metoda zwykle jest stosowana w urządzeniach do pomiaru prędkości (popularnie zwanych logami).

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n |\vec{v}|}{n} \quad (1.2)$$

gdzie

$n$  – ilość pomiarów branych do uśredniania.

Zależność (1.2) odnosi się do pomiarów dyskretnych. Należy zwrócić uwagę, że często stosowane są konstrukcje logów, w których podobne uśrednianie dokonywane jest w sposób analogowy.

Innym sposobem jest obliczanie prędkości średniej jako stosunku przebytej przez okręt drogi  $D$  do czasu  $t$ , w jakim została przebyta:

$$V = \frac{D}{t} \quad (1.3)$$

gdzie:

$D$  – droga;



W równaniach (1.2) i (1.3) wynik nie jest wielkością wektorową, co świadczy o tym, iż oznacza on tylko wartość wektora; z zasady nie określa się takiej informacji w odniesieniu do kierunku. Średnia wartość kierunku jest w istocie kątem drogi okrętu i w niniejszej książce nie będziemy się nią zajmować. W terminologii angielskiej powyższe rozbieżności są bardzo precyzyjnie różnicowane i określane: dla długości wektora prędkości stosuje się termin *speed* w odróżnieniu od *velocity*, który oznacza pełny wektor prędkości.

Oba warianty są równie często stosowane, zależnie od potrzeb i sposobu pomiaru. Należy jednak zauważyć, że nowoczesne urządzenia najczęściej dokonują pomiaru prędkości chwilowej, która w sztuczny sposób może zostać uśredniona przed wyświetleniem, głównie dla wygody i zgodnie z możliwościami percepcji człowieka. Nie zmienia to faktu, że równoległe wartości chwilowe transmitowane są do tych urządzeń nawigacyjnych, dla których funkcjonowania są niezbędne.

Dyskutując o pomiarze prędkości okrętu należy wyraźnie sprecyzować elementy środowiska, względem których prędkość ta jest określona. Problem ten nie występuje w przypadku ruchu obiektu na lądzie. W nawigacji morskiej mamy jednak do czynienia ze złożonym ruchem względem wody oraz dna (brzegu). Prędkość nad dnem opisuje ruch okrętu względem Ziemi, a więc dna morskiego i brzegu. Jest ona sumą wektorową prędkości okrętu po wodzie oraz wektora prędkości mas wody względem Ziemi. Prędkość nad dnem  $V_d$  (*speed over the ground* - SOG) może być obliczona jako stosunek drogi - mierzonej względem stałych punktów związanych z Ziemią - do czasu. Prędkość po wodzie  $V_w$  (*speed through the water* - STW) - jak to wynika z nazwy - jest określana względem mas wody, które zazwyczaj mają własną prędkość względem dna morskiego. Jest więc oczywiste, że prędkości po wodzie oraz względem dna będą równe tylko w przypadku, gdy nie występuje poziomy ruch mas wody.

Oba pojęcia nie są całkowicie jednoznaczne, bowiem ich interpretacja jest w znacznym stopniu związana ze sposobem pomiaru. Dla przykładu, SOG może być określona względem dna morza przez tzw. log dopplerowski – wówczas

będzie prędkością chwilową. Może jednak być obliczona przez odbiornik radionawigacyjnego systemu określania pozycji poprzez określenie odległości pomiędzy dwiema pozycjami i podzieleniu tejże przez czas. Oczywiście będzie to wówczas prędkość średnia. Dodajmy, że w tym przypadku czas przyjęty do pomiarów może być regulowany przez operatora.

Najpowszechniej stosowaną miarą prędkości w nawigacji morskiej jest węzeł, czyli prędkość odpowiadająca przebyciu mili morskiej w czasie 1 godziny. Ponadto pomiary prędkości wyrażane są w metrach na sekundę, a niekiedy w kablach na minutę.

$$1w. = \frac{Mm}{godz.} = \frac{1852m}{3600s} = 0,514 \frac{m}{s};$$

$$1w. = \frac{1852m}{60min} = 30,87 \frac{m}{min};$$

$$1w. = \frac{Mm}{godz.} = \frac{10kbl}{60min} = 0,17 \frac{kbl}{min}.$$

Z powyższego wynika, że w praktyce morskiej w celu zamiany prędkości wyrażonej w węzłach na wyrażoną w metrach na sekundę należy podzielić ją przez dwa i odwrotnie - aby przeliczyć na węzły prędkość wyrażoną w metrach na sekundę należy pomnożyć ją przez dwa ( $1m/s = 2 w.$ ).

W celu zamiany prędkości podanej w węzłach na wyrażoną w liczbie kabli przebytych w minutę należy prędkość w węzłach podzielić przez sześć; dla przeliczenia w odwrotną stronę - pomnożyć przez tę samą wartość.

Na zakończenie tych wstępnych rozważań należy przypomnieć podstawowe informacje o możliwych zakresach prędkości w praktyce morskiej. Okrety wypornościowe najczęściej poruszają się z prędkościami w zakresie 10 – 30 w., jakkolwiek mogą nastąpić odstępstwa od tych wartości. Na przykład, kutry rybackie w trakcie połowów poruszają się z prędkościami około 5 w., zaś szybkie promy, zwłaszcza dwukadłubowe (katamarany), zdolne są przekraczać 40 w. Jednostki niewypornościowe (wodoloty, poduszkowce) mogą osiągać prędkości do 100 w.

Ze względu na cechy układu napędowego nie stosuje się na okrętach płynnej zmiany prędkości lecz kilka typowych (zmienianych skokowo), do których należą:

- minimalna (mała naprzód);
- średnia (pół naprzód);
- ekonomiczna;
- maksymalna (cała naprzód);
- forsowna (ponadcała, ponadmaksymalna).

Prędkość *minimalna* to tak mała prędkość, przy której okręt jeszcze jest sterowny („słucha steru”). Nazwy *ekonomiczna* i *średnia* oznaczają odpowiednio prędkości, przy których na przebycie określonej drogi ponoszone są najmniejsze koszty, a *średnia* stanowi zwykle około 70% prędkości maksymalnej. Bardzo często prędkość *średnia* i *ekonomiczna* są tożsame. Prędkość *maksymalna* to taka prędkość, którą okręt może utrzymać przez dłuższy czas (wiele godzin) przy dopuszczalnych warunkach eksploatacji pracy silników oraz pełnej wyporności. Prędkość *forsowna* jest pojęciem typowo wojskowym – okręt może ją rozwinąć w specjalnych sytuacjach, co jednak daje negatywne skutki dla układu napędowego. Dlatego też nie powinna być stosowana bez istotnych przyczyn, a czas pływania z taką prędkością nie powinien być zbyt długi. Oficer marynarki wojennej powinien także znać pojęcie prędkość *małoszumna*. Odnosi się ono tylko do okrętów podwodnych i oznacza taką prędkość graniczną (większą od minimalnej) danego okrętu, przy której nie wytwarza on nadmiernego hałasu wywołanego przepływem wody względem kadłuba. Powyżej tej prędkości gwałtownie wzrasta poziom hałasu powodowanego przez okręt. Dodajmy, że prędkości *małoszumne* wynoszą zazwyczaj kilka węzłów, natomiast maksymalne prędkości współczesnych okrętów podwodnych przekraczają 20 w., a okrętów z napędem atomowym mogą wynosić nawet 40 w.

## Rozdział 2

### BUDOWA I CHARAKTERYSTYKA LOGÓW

#### 2.1. Klasyfikacja logów okrętowych

Log jest przyrządem o długiej historii, jednakże znacznie krótszej niż kompas magnetyczny. W swej pierwotnej postaci jest znany od kilkuset lat. Jego nazwa (dzisiejsza - stosowana powszechnie w wielu językach - została zachowana od początku istnienia tegoż urządzenia) pochodzi od angielskiego terminu *chip of log*, który można przetłumaczyć jako kawałek drewna, szczapa lub wiór. Wiąże się to wprost z pierwotną metodą pomiaru prędkości, tzw. logiem burtowym.

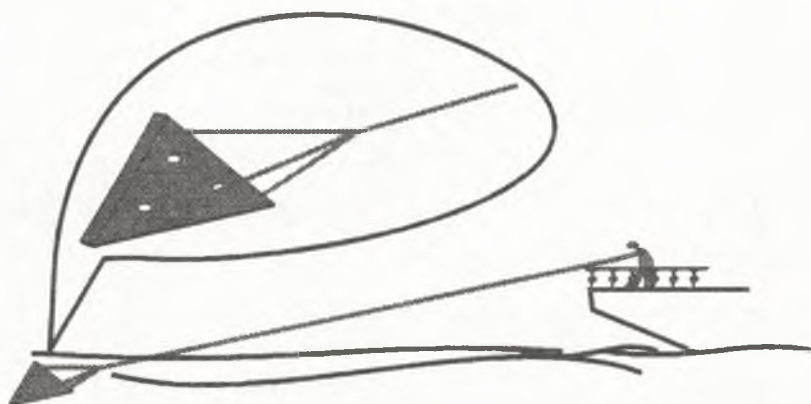
Metoda ta polega na pomiarze czasu, w jakim wyrzucony za burtę przedmiot przebywa określony odcinek, drogę - zwykle wzdłuż burty okrętu. Najczęściej dokonywano tego metodą wyrzucenia kawałka drewna przez członka załogi stojącego na dziobie. Moment ten był jednocześnie sygnałem do rozpoczęcia pomiaru czasu przez drugą osobę stojącą w miejscu oddalonym o znany odcinek drogi. W chwili gdy wyrzucony za burtę przedmiot przepływał obok drugiego członka załogi, ten kończył pomiar czasu. Znając drogę przebytą przez pływający przedmiot oraz czas można było obliczyć średnią prędkość okrętu za czas pomiaru. Opisany sposób okazywał się dostatecznie dokładny przy prędkościach rzędu 7 w., osiąganych przez żaglowce aż do końca XVIII wieku; w żegludze amatorskiej bywa stosowany do dziś.

Za pierwszy przyrząd do pomiaru prędkości można uznać log ręczny, który składał się z deski przymocowanej w odpowiedni sposób do linki wyrzucanej za burtę (rys.2.1). Deska miała zwykle kształt trójkąta lub wycinka koła i dzięki odpowiedniemu mocowaniu oraz obciążeniu jednego z boków zachowywała w wodzie pozycję pionową. Dodatkowo, w desce tej często nawiercano kilka otworów, bowiem przepływ wody przez nie wpływał korzystnie na stabilniejsze zachowanie się deski w wodzie. Wskutek tego



wyrzucona za burtę deska stawiała określony opór i powodowała wybieranie liki (logliny) z okrętu.

Z powyższym wiąże się powstanie jednostki prędkości, czyli węzła. W jednakowych odległościach na lince zawiązane były węzły. Liczba węzłów, które przesunęły się w dłoni obsługującego log marynarza w określonym czasie, oznaczała wprost prędkość okrętu. Literatura podaje, że węzły znajdowały się co pół metra, natomiast czas pomiarów wynosił około 10 s, bowiem tyle trwało zmówienie przez marynarza rymowanej modlitwy. Mocowanie dwóch spośród trzech linek łączących loglinę z deską nie było trwałe, dlatego po wykonaniu pomiaru powodowano rozłączenie tych końcówek poprzez szarpnięcie logliny. Dzięki temu deska przestawała stawiać opór i bez trudności można było ją wyciągnąć z wody.

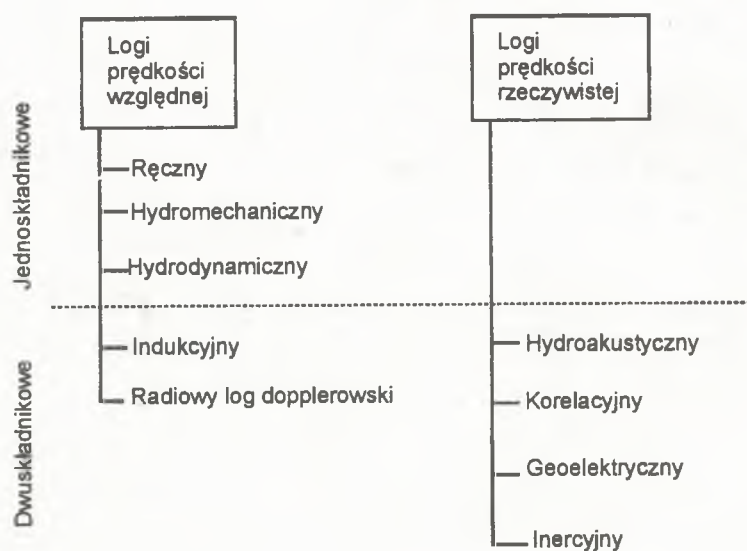


Rys. 2.1. Log ręczny

W późniejszym okresie do pomiaru czasu zastosowano klepsydrę, a zasadę pomiaru nieco zmodyfikowano. Zastosowano prosty przelicznik metrów na węzły - jednostką na loglinie była wielokrotność 0,5 m (wartość tę mnożono przez czas pomiaru zależny od wielkości klepsydry). Na przykład, jeżeli czas przesypywania klepsydry wynosił 10 s, wówczas węzły były wiązane co 5 m.

W takim wypadku, jeżeli w trakcie pomiaru na loglinie przesunęły się 4 węzły, oznaczało to, iż okręt porusza się z prędkością 20 m w czasie 10 s. Wynikało z tego, że okręt płynął z prędkością 2 m/s czyli 4 w.

Gdy pojawiły się zegarki mechaniczne, precyzja takich pomiarów wbrew pozorom nie zwiększyła się radykalnie, bowiem istotnym źródłem niedokładności pomiarów jest nieprecyzyjnie określony opór, jaki stawia deska w wodzie. W efekcie dokładności takiego logu oraz logu burtowego nie różniły się w istotny sposób, jednak pomiar prędkości nie absorbował już dwóch ludzi. Pojawiła się ponadto możliwość pomiaru prędkości nie tylko w dzień i przy dobrej pogodzie, przeciwnie niż w przypadku logu burtowego. Wraz z pojawieniem się logu burtowego termin *chip of log* zmienił brzmienie na *ship log* i od tego momentu urządzenia do pomiaru prędkości okrętu noszą tradycyjnie nazwę log (identycznie po angielsku i niemiecku; po rosyjsku *лаг*).



Rys. 2.2. Podział logów

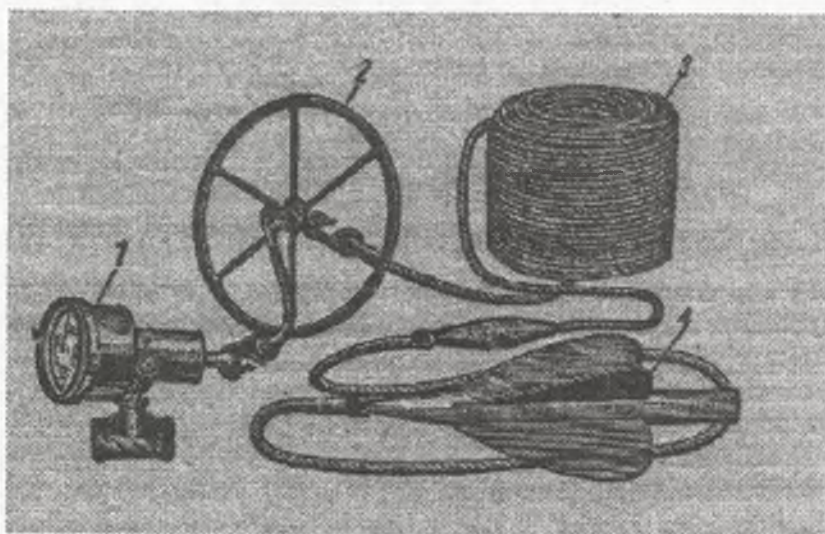
Wiek XIX oraz szczególnie XX to czas szybkiego rozwoju omawianych przyrządów. Pojawiają się przeróżne konstrukcje, oparte na odmiennych zasadach działania; logi zaczynają się dzielić na dwie zasadnicze grupy: poza

znanymi dotychczas logami mierzącymi prędkość po wodzie pojawiają się urządzenia pozwalające na pomiar prędkości względem dna. Obecny podział logów przedstawiono na rys. 2.2.

Dla uproszczenia podziału nie zaznaczano przypadków, gdy logi mogą występować w wariacie jedno- lub dwuskładnikowym. Powyższy rysunek wskazuje, że log dwuskładnikowy może występować w uproszczonym wariacie jednoskładnikowym, ale odwrotne przypadki nie są spotykane.

## 2.2. Log hydromechaniczny

Logi hydromechaniczne są najstarszymi (spośród znanych) miernikami prędkości okrętu względem wody stosowanymi od początku naszego wieku. Jeśli są spotykane obecnie to jedynie jako wyposażenie rezerwowe. Omawiane logi składają się ze śruby, logliny, koła zamachowego i licznika przebytej drogi. Działają na zasadzie zliczania obrotów śruby w wodzie spowodowanych działaniem ciśnienia na pióra śruby. W najstarszych tego typu logach ruch wirowy śruby jest przekazywany przez loglinę do licznika odległości.



Rys. 2.3. Log hydromechaniczny  
1-licznik logu; 2-koło zamachowe; 3-loglina; 4-śruba



W dwóch przeciwległych piórach śruby logu znajdują się wycięcia, które wskutek odpowiedniego wygięcia umożliwiają regulację obrotów śruby w wodzie. Liczba obrotów przypadających na jedną milę morską jest różna – w zależności od typu logu - przeciętnie wynosi od 850 do 880. Loglina przeważnie wykonana jest z bawełny i posiada specjalny splot zapobiegający jej skręcaniu podczas pracy. Jej długość przeważnie waha się w granicach od 70 do 150 metrów i zależy od prędkości okrętu, kształtu kadłuba, wysokości umocowania licznika nad powierzchnią wody oraz miejsca jego zamontowania. Koło zamachowe służy do stabilizacji obrotów logliny. Licznik przebytej drogi mocowany jest w rufowej części jednostki pływającej na przegubie umożliwiającym ustawianie się osi obrotowej licznika w przedłużeniu logliny.

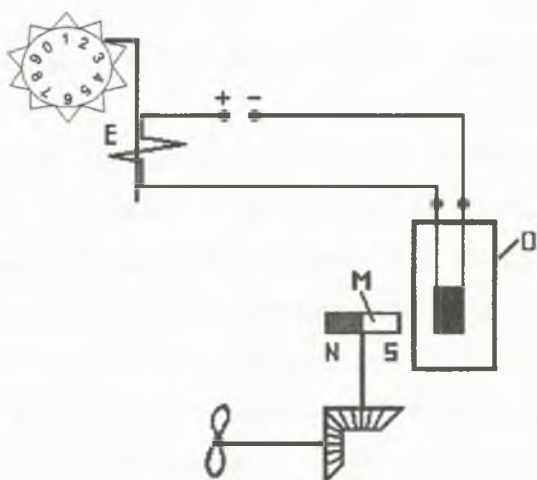
Zasadniczą wadą tego typu logów jest stosunkowo długa loglina holowana za okrętem ograniczająca swobodę manewrowania okrętu. Ponadto mogą być stosowane tylko przy ograniczonym zakresie prędkości - zwykle powyżej 2-3 w. i nie większym niż 20 w. Ze względu na długą linę holowaną za okrętem log taki może być stosowany tylko na otwartych akwenach.

Logi hydromechaniczne bywały stosowane jeszcze w latach sześćdziesiątych, jednak obecnie zaprzestano ich używania.

Współczesną modyfikacją logu hydromechanicznego jest urządzenie, którego śruba nie jest holowana za okrętem, lecz umocowana w metalowym trzonie i wysunięta poza kadłub przez specjalny otwór z zaworem dennym (dławicą). Nazywane jest ono często również dennym logiem mechanicznym. Obroty śruby logu nie są przekazywane w tym przypadku mechanicznie do wskaźnika logu, lecz powodują okresowe przerwy w przepływie prądu elektrycznego lub czasowe zamykanie obwodu. Licznik przebytej drogi zlicza tylko ilość przerw lub impulsów.

Początkowo budowano logi, których śruba powodowała (przez przekładnię mechaniczną) rozwarcie styków i przerwę w obwodzie elektrycznym. Zasadniczą wadą tego typu logów był fakt, iż mechanizm podwodny (śruba, przekładnia mechaniczna, styki elektryczne), który stanowił najczęstszą przyczynę awarii, musiał pracować w wodzie pod kadłubem okrętu.

Później je zmodyfikowano - zamiast przekładni mechanicznej zastosowano metodę uruchamiania styków magnesem obracającym przez śrubę. Styki znajdowały się w szczelnej obudowie z materiału diamagnetycznego. Od nazwy firmowej popularnej odmiany tych logów nazywane są one często logami Czernikiejewa. Schemat takiego urządzenia przedstawiony jest na rysunku 2.4.



Rys 2.4. Zasada działania logu mechanicznego z magnetycznym uruchamianiem styków  
M - magnes; E – elektromagnes licznika przebytej drogi;  
O – stycznik w hermetycznej obudowie

Obracającą się w wodzie śruba napędza magnes M przez prostą przekładnię mechaniczną. W niektórych konstrukcjach magnes jest wręcz umieszczony na osi śruby. Obracający się obok obudowy stycznika magnes przyciąga sprężynę z jednym stykiem powodując rozwarcie obwodu elektrycznego zasilanego prądem stałym. Elektromagnes E przyciąga kotwicę i wymusza obrót o jedną pozycję wskaźnika w liczniku przebytej drogi.

Zaletą logów hydromechanicznych jest ich prosta budowa, ewentualne nieskomplikowane usterki, łatwa konserwacja i obsługa. Do wad należy zaliczyć między innymi: małą dokładność wskazań, trudności regulacji, częste awarie i przerwy w pracy powodowane blokowaniem śruby logu przez zanieczyszczenia oraz wodorosty a także brak wskazań na płytkich wodach, bowiem możliwość

łatwego uszkodzenia wymaga podniesienia czujnika. Istotną wadą tego logu jest fakt, że nie wykazuje on prędkości, a tylko przebytą drogę. Ponadto zazwyczaj zaczyna funkcjonować powyżej pewnej minimalnej prędkości rzędu 2-3 w. Log ten nie może również służyć do pomiarów w trakcie ruchu okrętu wstecz.

Logi hydromechaniczne nie są obecnie stosowane na okrętach, natomiast często spotkać je można na kuterach rybackich oraz jednostkach sportowych i pomocniczych.

W przypadku instalowania na jednostce logu zaburtowego należy uwzględnić poniższe zalecenia.

- Licznik logu powinien być zamontowany na burcie rufy statku, na specjalnym wysięgniku lub wsporniku, tak aby śruba logu nie znajdowała się w strumieniu wody zaburzonym przez ruch jednostki.
- Elementy do mocowania logu powinny znajdować się w takim miejscu, aby elementy ruchome logu - lina i koło zamachowe - nie miały kontaktu z kadłubem, zwłaszcza podczas zwrotów.
- Gniazdo wtykowe zasilania powinno znajdować się w pobliżu miejsca mocowania logu, by przewód zasilający nie utrudniał ruchów elementów logu; winno być umocowane w taki sposób, aby przewód ten nie stwarzał zagrożenia dla ruchu załogi, a w szczególności zostało wyeliminowane ryzyko potknięcia się o niego.

W przypadku logów Czernikiejewa zaleca się zastosowanie poniższych wskazówek.

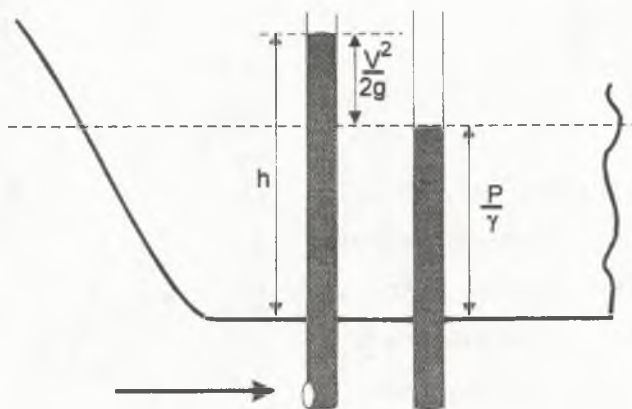
- Najkorzystniejszym miejscem instalowania elementów podwodnych logu (śruby) jest obszar śródkręcia, nie bliżej niż  $1/3$  długości okrętu od dziobu. Nie można dopuścić, aby element ten ulegał w jakichkolwiek sytuacjach eksploatacyjnych (przechyłach, falowaniu, niewłaściwym załadowaniu statku) wynurzeniu.
- Właściwym miejscem instalacji elementów podwodnych logu jest płaszczyzna diametralnej - dla uniknięcia wpływu nieliniowego przepływu strug wody na funkcjonowanie logu.

- W pobliżu elementu podwodnego (w szczególności przed nim) nie powinny znajdować się wystające elementy, które mogłyby zaburzać przepływ wody.

### 2.3. Log hydrodynamiczny

Zasada działania logów ciśnieniowych oparta jest na związku ciśnienia hydrodynamicznego strumienia wody przepływającej pod dnem okrętu z jego prędkością. Ich zadaniem jest pomiar ciśnienia hydrodynamicznego wywołanego ruchem okrętu i przeliczanie tego ciśnienia na jednostki prędkości.

Dla zrozumienia istoty zastosowanego rozwiązania należy przypomnieć, iż na określonej głębokości (przyjmijmy dla ułatwienia, że jest to głębokość zanurzenia okrętu) panuje ciśnienie statyczne wody wynikające z zanurzenia okrętu.



Rys.2.5. Idea rozwiązania stosowanego w logach hydrodynamicznych



Wyobraźmy sobie, że przez kadłub okrętu przeprowadzono dwie szklane rury umocowane jak na rysunku 2.5. Załóżmy ponadto, że jedna z nich jest umieszczona tak, by jeden z jej otworów był ustawiony w kierunku ruchu okrętu, a druga pionowo. Przy tym różnica pomiędzy poziomami, na których pod kadłubem rury te są zanurzone, nie będzie wielka. Jest oczywiste, że gdy okręt będzie w bezruchu, jednakowy poziom słupa wody w obu rurach będzie sięgał linii wodnej. Gdy okręt zacznie się przemieszczać naprzód, w jednej z rur wzrośnie wysokość słupa wody wskutek dodatkowego naporu wody związanego z ruchem jednostki (wody względem kadłuba).

Do przejmowania ciśnienia przepływającej wody służy rurka odbiorcza wystająca poza dno okrętu i skierowana otworem wlotowym w stronę dziobu. Podczas ruchu okrętu przez kanał rurki przepływa woda o ciśnieniu, którego wielkość można obliczyć na podstawie równania Bernoulliego; słup wody można obliczyć według zależności:

$$h = \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma}, \quad (2.1)$$

gdzie:

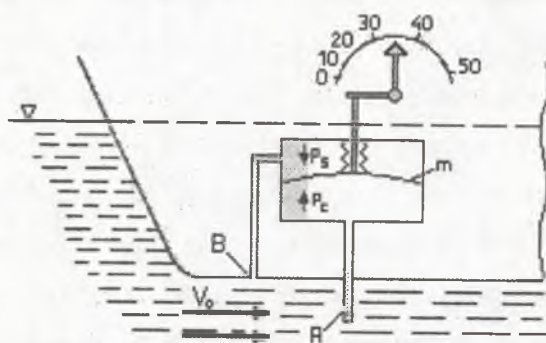
- $h$  - wysokość słupa wody;
- $V$  - prędkość strumienia wody;
- $g$  - przyspieszenie ziemskie;
- $P$  - ciśnienie statyczne wody;
- $\gamma$  - ciężar właściwy wody.

Ze wzoru wynika jednoznacznie, że wysokość słupa wody w tej rurze zależy od dwóch składowych:

- 1) ciśnienia dynamicznego zależnego od prędkości okrętu;
- 2) ciśnienia statycznego panującego na danej głębokości.

Wysokość słupa wody w drugiej rurze jest zależna tylko od ciśnienia statycznego.

Ciśnienie całkowite wody w rurce odbiorczej powstające podczas ruchu okrętu nie może być wykorzystane bezpośrednio do określania prędkości okrętu, ze względu na fakt, iż jest ono sumą obu powyższych ciśnień. Jednakże istnieje możliwość pomiaru prędkości okrętu - poprzez porównanie ciśnień w obu rurkach. Jest to powszechnie dokonywane w tzw. komorze różnicowej, nazywanej również manometrem. Schemat takiego urządzenia przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Zasada działania komory różnicowej  
 $P_s$  - ciśnienie statyczne;  $P_c$  - ciśnienie całkowite;  $m$  - membrana

Ponieważ w obu rurkach występuje ciśnienie statyczne, czyli doprowadzone z dwóch stron membrany będącej najistotniejszym elementem komory różnicowej, oddziałują one na nią w jednakowy sposób. W związku z tym nie obserwujemy żadnej reakcji urządzenia. W momencie gdy okręt zaczyna się poruszać, w jednej z rurek wzrasta ciśnienie, ponieważ pojawia się ciśnienie dynamiczne. Ciśnienia z obu stron membrany nie są równe, w efekcie czego membrana zaczyna się odkształcać, a dzięki odpowiedniemu wyskalowaniu urządzenia możliwy jest pomiar - poprzez układ dźwigni - prędkości przepływającej wody. Komora różnicowa nazywana jest niekiedy



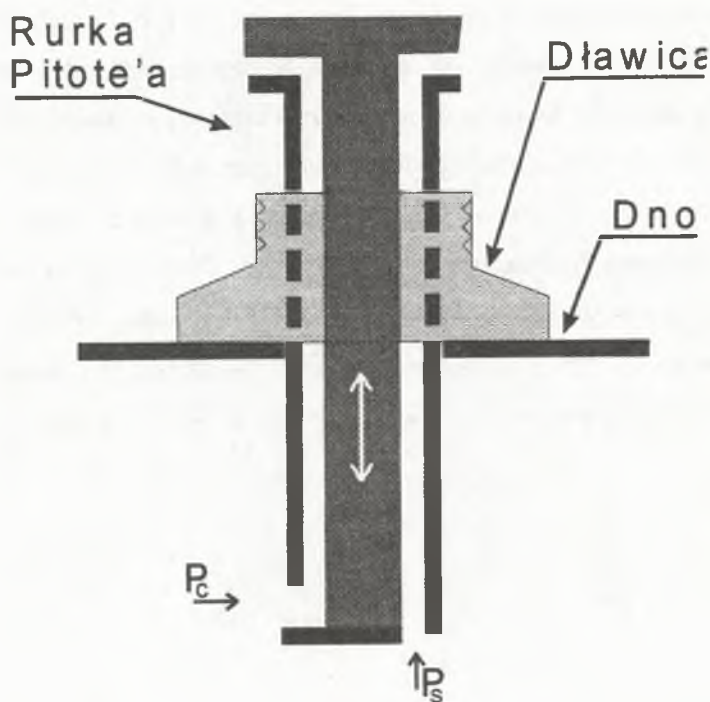
również manometrem logu, a w dokumentacji logów radzieckich (ŁG - 4, ŁG - 6, MGL - 25 i MGL - 50) nosi również nazwę „aparatu sylfonowego”.

Równanie Bernoulliego jest prawdziwe dla cieczy idealnej, której lepkość równa się zeru. W rzeczywistości pomiar ciśnienia jest obarczony błędem, którego źródła i charakter opisane są poniżej. W przypadku analizy opisywanego logu należy założyć, że prędkość strumienia opływającej kadłub okrętu wody jest tożsama z prędkością okrętu, a woda ta jest cieczą idealną. Zwrócić trzeba tylko uwagę na fakt, iż kadłub okrętu zanurzony w wodzie wprowadza zakłócenie w swobodnym przepływie strumienia wody wokół niego. W związku ze swym stosunkowo skomplikowanym kształtem kadłub pływającego okrętu powoduje znaczne zróżnicowanie ciśnień w otaczającej przestrzeni. Dlatego należy podkreślić, iż umiejscowienie punktu pomiaru ciśnienia dynamicznego A (rys.2.6) nie może być przypadkowe. Odnosi się to do wszystkich logów.

W przypadku logów hydrodynamicznych w celu odsunięcia punktu pomiarowego od kadłuba okrętu stosuje się tzw. rurkę Pitote’a. Zazwyczaj jest to wykonany z mosiądzu element w kształcie rury, często o eliptycznym przekroju. W rurce Pitote’a wykonuje się dwa kanały, z których jeden ma wylot skierowany wzdłuż, a drugi - w poprzek osi rurki. W ten sposób oba punkty pomiarowe znajdują się obok siebie, a dzięki wysunięciu ich poza strefę, w której kadłub okrętu wywołuje zakłócenie w mierzonym polu ciśnień (rzęd 1 m lub większy), eliminuje się źródło błędów pomiarowych. Należy jednak zwrócić uwagę, że rurka Pitote’a wystaje na znaczną odległość od kadłuba okrętu, co jest częstą przyczyną jej uszkodzeń. Z tego też powodu wymaga ona szczególnej obsługi – w szczególności podnoszenia, gdy okręt zbliża się do akwenów płytkowodnych (w szczególności portu) lub takich, w których mogą nastąpić jej uszkodzenia z innych przyczyn. Najczęstszymi przyczynami uszkodzenia rurki są pływające przedmioty, zwłaszcza belki drewniane i temu podobne przedmioty, ale również worki polietylenowe (np. po nawozach sztucznych).

Aby zrozumieć powyższy problem, należy zwrócić uwagę na fakt, że rurka Pitote’a nie tylko przechodzi przez kadłub okrętu, ale jednocześnie przesuwana się w górę i w dół, do czego muszą być zapewnione warunki. Wymaga to

zastosowania szczelnej dławicy wbudowanej w kadłub okrętu. Różnice między przekrojem dławicy i rurki muszą w związku z tym być tak minimalne, że przy najmniejszych wygięciach rurki przesuwanie jej staje się niemożliwe.



Rys. 2.7. Sposób mocowania rurki Pitote'a

Zależnie od typu okrętu można rozróżnić trzy rodzaje omawianych rurek:

- 1) dłuższe - dla statków z podwójnym dnem;
- 2) krótsze - gdy montowana jest w miejscu, w którym jest dno pojedyncze;
- 3) z jednym przewodem - dla małych jednostek, które nie zmieniają swego zanurzenia (np. kutry).

Podczas analizy budowy logów hydrodynamicznych szczególną uwagę należy zwrócić na znaczenie elementów układu hydraulicznego służących do odpowietrzania układu.

Konieczne jest, by komora różnicowa znajdowała się poniżej linii wodnej, bowiem w przeciwnym wypadku ciśnienie statyczne nie spowoduje podniesienia

słupa wody na tyle wysoko, aby dotarł on do membrany komory różnicowej. Natomiast informacja o prędkości powinna być dostarczona do kabiny nawigacyjnej, która zwykle znajduje się na znacznej wysokości ponad linią wodną. Dlatego zasadnicza część logu hydrodynamicznego znajduje się zawsze w pomieszczeniu usytuowanym poniżej linii wodnej, w pobliżu rurki Pitote'a.

Gdy okręt nie porusza się, ciśnienia w obu rurkach zależą jedynie od zanurzenia okrętu. W komorze różnicowej oba ciśnienia są równe  $/P_s = P_c/$ . Na górną powierzchnię membrany podczas ruchu okrętu działa ciśnienie statyczne  $P_s$ , a na powierzchnię dolną - całkowite  $P_c$ , które jest sumą ciśnienia statycznego  $P_s$  i dynamicznego  $P_D$  wywołanego ruchem okrętu. Zatem, podczas ruchu okrętu membrana komory różnicowej jest pod działaniem jedynie ciśnienia dynamicznego  $P_D = P_c - P_s$ . W uproszczeniu - połączony z membraną wskaźnik wskazuje prędkość okrętu. Do powyższego układu jest stosowane następujące równanie:

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_C}{\gamma} = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_S}{\gamma} \quad (2.2)$$

gdzie:

$V_A$  - prędkość wody w punkcie A;

$V_B$  - prędkość wody w punkcie B;

$P_C$  - ciśnienie wody w punkcie A;

$P_S$  - ciśnienie wody w punkcie B.

Jeżeli prędkość okrętu w stosunku do wody wynosi  $V$ , to prędkość wody przepływającej obok otworu B będzie także równa  $V$ . Otwór A w rurce Pitote'a, zwrócony jest w kierunku dziobu okrętu i połączony z hermetycznie zamkniętą komorą różnicową. W rurce tej prędkość wody  $V_A$  będzie równa zero. Można więc napisać :

$$\frac{P_c}{\gamma} = \frac{V^2}{2g} + \frac{P_s}{\gamma}. \quad (2.3)$$

Po przekształceniu powyższej zależności otrzymujemy:

$$P_d = \frac{\gamma}{2g} \cdot V^2 = P_c - P_s. \quad (2.4)$$

Należy zwrócić uwagę, że wartość ciśnienia dynamicznego zależna jest od kwadratu prędkości. Oznacza to, że owo ciśnienie bardzo szybko wzrasta wraz ze zwiększaniem się prędkości. Konstruktorzy logów muszą zatem spełnić warunek: membrana powinna być delikatna, aby reagowała na drobne zmiany prędkości okrętu, bowiem tylko wówczas log będzie czuły. Jednak wówczas delikatna membrana przy dużych prędkościach zostanie zniszczona wskutek gwałtownie wzrastającego ciśnienia. Zwróćmy uwagę, że membrana zwykle znajduje się w stanie odkształcenia, z wyjątkiem przypadku, gdy okręt nie płynie. Jest to bardzo niekorzystne zjawisko powodujące utratę istotnej cechy membrany - elastyczności.

Wobec powyższego, w rzeczywistych konstrukcjach logów hydrodynamicznych stosuje się modyfikacje omówionego rozwiązania polegające na sprowadzaniu membrany do położenia zerowego i jednoczesnym pomiarze siły, która jest do tego niezbędna. Siła ta wytwarzana jest zazwyczaj przez układ dźwigni i sprężyn lub za pomocą dźwigni i elektromagnesu.

Z zależności 2.4 wynika, że znając ciśnienie dynamiczne  $P_D$  możemy obliczyć prędkość okrętu względem wody  $V$ :

$$V = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot P_D}. \quad (2.5)$$



Należy dodać, że wyprowadzone powyżej równanie dotyczy cieczy idealnej, to znaczy jednorodnej, nie zmieniającej swej objętości przy różnicowaniu ciśnienia, bez wewnętrznych sił tarcia i przyciągania.

W związku ze sprzecznymi wymaganiami dotyczącymi membrany komory różnicowej i stosowania układu sprowadzającego membranę do położenia zerowego, we współczesnych konstrukcjach logów hydrodynamicznych manometr nie jest bezpośrednim miernikiem prędkości a jedynie czujnikiem zmian prędkości. Oznacza to, że membrana odkształca się nieznacznie tylko w momentach zmiany prędkości, a podczas jednostajnego ruchu okrętu zajmuje położenie zerowe (sprowadzana jest do tego położenia przez układy sprężyn i serwomechanizmów). Dzięki temu jakość membrany i jej sprężystość przez dłuższy czas pozostają bez zmian i nie powodują zmiany dokładności wskazań logu.

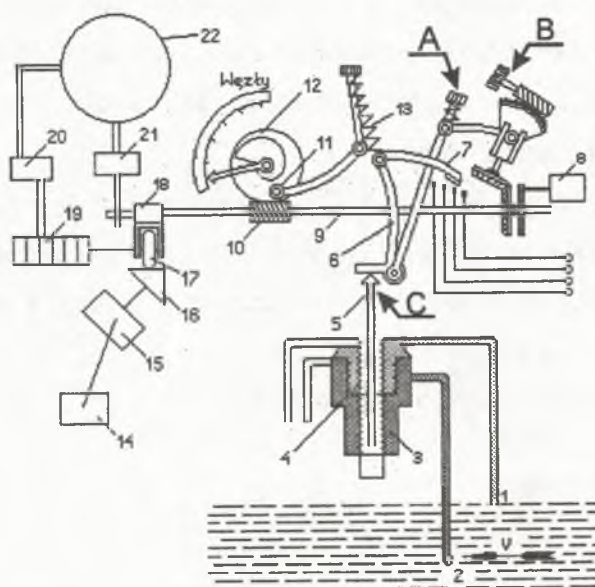
W stosowanych współcześnie logach hydrodynamicznych znalazły zastosowanie mechaniczne i elektromagnetyczne układy kompensacyjne. Rola obu rodzajów kompensacji jest taka sama i polega na wytworzeniu siły przeciwdziałającej odkształcaniu membrany przez ciśnienie dynamiczne. W eksploatacji mechaniczne układy kompensacyjne charakteryzują się większą stabilnością i dłuższym okresem pracy, dlatego są częściej stosowane od tańszych układów elektromagnetycznych ulegających wpływom otoczenia, takim jak wilgotność lub temperatura.

Schemat ideowy logu z kompensacją mechaniczną przedstawia rysunek 2.8.

Rurka ciśnienia statycznego (1) wraz z rurką ciśnienia całkowitego (2) doprowadza ciśnienie do komory różnicowej (3). Komora jest rozdzielona na dwie części membraną (4), do której przymocowano pionowy pręt (5). Gdy okręt zaczyna płynąć (wskutek różnicy ciśnień) membrana podnosi się do góry i przez pręt (5) odchyła dźwignię (6) w prawo. Powoduje to zamknięcie obwodu elektrycznego silnika (8) przez styk (7). Silnik zaczyna obracać się okręcając jednocześnie wałek (9). Umieszczony na tym wałku ślimak (10) przesuwają się i obraca ślimacznice (12) a wraz z nią wskazówkę i mimośród. Dźwignia (11) pod wpływem działania mimośrodu odchyła się ściskając sprężynę (13), której



moment siły będzie działał przez dźwignię (6) na pręt (5) i spowoduje powrót membrany do położenia zerowego. Jednocześnie styk (7) wyłączy silnik (8), a wskazówka połączona z tym układem znajdzie się w innym położeniu niż poprzednio i wskaże aktualną prędkość.



Rys.2.8. Schemat ideowy logu z kompensacją mechaniczną

- 1 - rurka ciśnienia statycznego; 2 - rurka ciśnienia całkowitego;  
 3 - komora różnicowa; 4 - membrana; 5 - pionowy pręt; 6 - dźwignia;  
 7 - styk elektryczny; 8 - silnik elektryczny; 9 - wałek; 10 - ślimak;  
 11 - dźwignia; 12 - ślimacznica; 13 - sprężyna; 14 - silnik czasu;  
 15 - regulator obrotów; 16 - stożek; 17 - kółko; 18 - karetką; 19 - licznik drogi; 20 -  
 selsyn nadawczy; 21 - selsyn odbiorczy;  
 22 - powtarzacz; A, B, C - regulatory

Jeżeli prędkość okrętu maleje, zmniejsza się ciśnienie wody w rurce (2), nacisk sprężyny (13) powoduje, że membrana obniża się pociągając za sobą pręt (5) i dźwignię (6). Wraz z dźwignią odchyła się w lewo styk (7) powodując włączenie silnika (8). Obroty silnika w tym przypadku są przeciwne niż przy zwiększaniu prędkości. Wałek (9) i ślimacznica (12) wraz ze wskazówką obracają się w odwrotnym kierunku. Dźwignia (11) zacznie się podnosić, a sprężyna (13) (zmniejszając naciąg) powoduje powrót pręta i membrany do

położenia zerowego. Silnik zostaje wyłączony i układ powraca do położenia równowagi, a wskazówka znajduje się w tym momencie w innym położeniu wskazując aktualną prędkość.

Do obliczania drogi przebytej przez okręt służy mechanizm drogi, który w sposób ciągły mnoży prędkość okrętu przez czas i sumuje otrzymane wyniki. W stosowanych konstrukcjach logów hydrodynamicznych mechanizm drogi jest zwykle układem elektromechanicznym. Przykładowa konstrukcja (rys.2.8) składa się z silnika (14), regulatora obrotów (15), stożka (16), kółka (17) i mechanicznego licznika drogi (19).

Po uruchomieniu logu silnik (14) obraca się ze stałą prędkością kątową obracając stożek z prędkością  $N$  obr./min. Kółko (17) jest dociśnięte do stożka i może przesuwac się po jego boku, a wskutek tarcia w punkcie styku obraca się dookoła własnej osi podczas obrotu stożka.

Można to opisać następującym równaniem:

$$2\pi NR = 2\pi nr, \quad (2.6)$$

gdzie:

$N$  - liczba obrotów stożka;

$n$  - liczba obrotów kółka;

$R$  - promień koła wykreślonego na powierzchni bocznej stożka przez toczące się kółko;

$r$  - promień kółka.

Z równania (2.6) wynika liczba obrotów kółka:

$$n = R \frac{N}{r}. \quad (2.7)$$

Należy zwrócić uwagę, że dokładność obliczania drogi poprzez zliczanie obrotów kółka  $n$  jest ściśle zależna od stabilności obrotów stożka  $N$ . W związku z tym silnik napędzający stożek jest wyposażony w regulator obrotów (15)

pozwalający przyjąć wartość  $N$  za stałą. Promień  $r$  kółka nie zmienia się, a układ sprężyn powoduje docisk kółka do stożka i nie pozwala na poślizg. Po uwzględnieniu powyższych założeń obroty kółka (17) zależą jedynie od miejsca, w jakim przylega ono do powierzchni bocznej stożka.

Przy prędkości okrętu równej zero kółko znajduje się na wierzchołku stożka ( $R=0$ ) i nie obraca się. Wskutek zwiększenia prędkości silnik (8) obraca wałkiem (9), co powoduje przemieszczenie się karetki (18) i kółka wzdłuż tworzącej stożka na odległość proporcjonalną do prędkości okrętu. Obroty kółka przekazywane są do mechanicznego licznika drogi (19), który zlicza je i pokazuje długość przebytej przez okręt drogi. Wskazania prędkości i przebytej drogi są przekazywane na selsyny nadajniki (20) i (21) a następnie do powtarzacza (22), który może znajdować się w dowolnym miejscu na okręcie.

Jako powtarzacze wskazań logu stosowane są:

- wskaźniki prędkości;
- wskaźniki zintegrowane prędkości i przebytej drogi;
- wskaźniki prędkości i przebytej drogi z wbudowanym odległościomierzem sygnalizującym pokonanie przez okręt nastawionego odcinka odległości.

Zależność prędkości okrętu względem przepływającej wody od jej gęstości i ciśnienia wywołanego ruchem okrętu, wyrażona wzorem (2.5), jest prawdziwa dla cieczy idealnej. Znajdujące się w wodzie morskiej mikroorganizmy, pęcherzyki powietrza oraz zmieniająca się wraz z temperaturą spoistość powodują, że różni się ona od cieczy idealnej i znacznie wpływają na zależność ciśnienia  $P_D$  od prędkości. Dlatego też równanie (2.5) należy zapisać w postaci:

$$P_D = k \cdot V^2 \quad (2.8)$$

gdzie

$k$  - współczynnik hydrodynamiczny Pitote'a.

Współczynnik  $k$  uwzględnia wszelkie czynniki różniące środowisko hydrologiczne wokół okrętu od cieczy idealnej. Jego wartość zależy od fizycznego i chemicznego składu wody morskiej, zmiany spoistości wody przy zwiększaniu lub zmniejszaniu temperatury, kąta odchylenia osi otworu roboczego rurki odbiorczej Pitote'a od kierunku ruchu wody, głębokości zanurzenia rurki pod kadłubem okrętu, grubości warstwy wody „pociąganej” przez kadłub, głębokości morza pod przepływającym okrętem itp. W warunkach idealnych współczynnik ten wynosi 1, natomiast w przypadku wody morskiej waha się w granicach 0,8 - 1,5.

Wartość współczynnika  $k$  dla danego kadłuba konkretnego okrętu czy statku jest doświadczalnie określana podczas regulacji logu. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono, że współczynnik  $k$  jest proporcjonalny do prędkości okrętu

$$k = f(V). \quad (2.9)$$

Kształt funkcji (2.9) jest różny dla poszczególnych kadłubów, jednak z dostatecznym przybliżeniem można ją aproksymować przez równanie linii prostej w następującej postaci:

$$k = a + bV, \quad (2.10)$$

gdzie:

$a$  - składowa stała niezależna od prędkości okrętu odpowiadająca

wartości współczynnika  $k$  przy prędkości  $V = 0$ ;

$b$  - tangens kąta nachylenia prostej  $k$  względem osi  $V$ .

Zależność współczynnika  $k$  od prędkości  $V$  jest różna dla różnych kadłubów, lecz różni się nieco w przypadku poszczególnych egzemplarzy logów i okrętów. Podlega ponadto zmianom związanym z upływem czasu. W rzeczywistości nie jest prostą i tylko w dużym przybliżeniu może być opisana



funkcją (2.10), w związku z tym trudno opisać jej przebieg ściśle za pomocą metod analitycznych. Z tych przyczyn określa się ją eksperymentalnie; jednak ze względów ekonomicznych trudno wyobrazić sobie, aby przebieg wspomnianej funkcji można było określać w zbyt wielu punktach pomiarowych. Dlatego powszechnie praktykuje się dokonywanie pomiarów w trzech punktach - dla trzech charakterystycznych prędkości okrętu: minimalnej, podróżnej oraz maksymalnej ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ). Na tej podstawie aproksymuje się wspomnianą krzywą i reguluje log. Każdy log hydrodynamiczny posiada odpowiednie układy regulacyjne, które umożliwiają dokonanie doboru uchybu logu poprzez dopasowanie współczynnika  $k$  do rzeczywistych warunków pracy omawianego urządzenia na okręcie. Czynności tych nie dokonuje nawigator lecz pracownik serwisu. Przy prawidłowym ustawieniu regulatorów log ciśnieniowy pokazuje prędkość okrętu z błędem nie przekraczającym  $\pm 2,0\%$ . Zasady dokonywania tych czynności opisano w rozdziale 3.

Regulacji nie przeprowadza się na okręcie samodzielnie, lecz powierza specjalistom. Istotne jest, by nie dokonywać jej zbyt pochopnie. Jeżeli zostaną stwierdzone niedokładności we wskazaniach logu, zaleca się raczej uwzględnić odpowiednią poprawkę wskazań.

Błędne wskazania logów hydrodynamicznych w dużym stopniu wynikają z faktu zapowietrzania się układu hydraulicznego logu. Pęcherzyki powietrza znajdujące się w wodzie gromadzą się w komorze różnicowej zniekształcając prawidłowość pomiaru, a tym samym wskazania logu. Zmusza to operatora logu do częstego odpowietrzania układu hydraulicznego. Instrukcje obsługi wszystkich typów logów hydrodynamicznych nakazują regularnie (zwykle co cztery godziny, gdyż zbiega się to ze zmianą wachty) usuwać powietrze ze zbiorników odpowietrzających. W przypadku silnego kołysania, zwłaszcza wzdłużnego, korzystnie jest odpowietrzać log (komorę różnicową) nawet częściej. Z praktyki okrętowej wynika, że po tej operacji znacznie zwiększa się dokładność jego wskazań.

W tabeli 2.1 dokonano porównania danych technicznych wybranych logów hydrodynamicznych stosowanych na okrętach MW RP.



Tabela 2.1. Dane techniczne wybranych logów ciśnieniowych

| Lp. | Rodzaj logu                                                             | LG - 4 | LG - 6  | MGL - 25 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|--------|---------|----------|
|     | Wyszczególnienie                                                        |        |         |          |
| 1.  | Zakres pomiarowy [w.]                                                   | 6 – 45 | 10 - 60 | 3 – 25   |
| 2.  | Rozdzielczość skali wskaźnika prędkości [w.]                            | 0,5    | 1,0     | 0,5      |
| 3.  | Dopuszczalna niezgodność powtarzaczy ze wskazaniami przyrządu głównego: |        |         |          |
|     | - wskazania prędkości [w.]                                              | ± 0,5  | ± 1,0   | ± 0,25   |
|     | - wskazania przebytej drogi [mile]                                      | ± 0,01 | ± 0,01  | ± 0,01   |
| 4.  | Zakres kompensacji błędu logu:                                          |        |         |          |
|     | - stałego „a” [%]                                                       | ± 15   | ± 15    | ± 10     |
|     | - zmiennego „bV” [%]                                                    | ± 10   | ± 10    | ± 8,0    |

Logi hydrodynamiczne cechują się znaczną zależnością ostatecznych błędów pomiaru prędkości i przebytej drogi w funkcji prędkości, która wynosi ok. 5% dla małych prędkości rzędu 5 w. i maleje do około 1% dla prędkości powyżej 15 w.

W wyniku analizy wartości zawartych w tabeli 2.1 można jednoznacznie stwierdzić, że nie odpowiadają one już standardom określonym w rezolucji IMO (A. 824) precyzującej wymagania, jakie powinny realizować logi okrętowe. Ponadto log LG - 6 nie spełnia kryteriów dotyczących dokładności odczytu oraz dopuszczalnej różnicy wskazań między powtarzaczami a przyrządem głównym. Na wyniki pomiarów prędkości i przebytej drogi wpływ mają błędy instrumentalne logów wynikające z konstrukcji układów mechaniczno - elektrycznych oraz zastosowanych rozwiązań technologicznych. Dlatego logi te są powszechnie zastępowane przez logi indukcyjne.

Logi ciśnieniowe mają (poza wspomnianymi) wiele wad, do których między innymi zaliczamy:

- pomiar prędkości tylko przy ruchu do przodu;

- wprowadzenie wody morskiej (pod znacznym ciśnieniem) do przyrządu centralnego, a w konsekwencji - do wnętrza okrętu;
- konieczność częstego odpowietrzania układu hydraulicznego w czasie eksploatacji;
- brak możliwości pomiaru w rejonach płytkowodnych.

Do zalet można zaliczyć tylko trwałość i prostotę budowy urządzenia, względną łatwość kalibracji oraz konkurencyjną cenę.

Instalując log hydrodynamiczny na okręcie należy przestrzegać poniższych zasad.

- Rurka Pitote'a powinna być wysunięta poza kadłub w miejscu, gdzie przepływ wody względem kadłuba ulega zaburzeniom w najmniejszym stopniu. Jest to zwykle obszar śródokręcia, ewentualnie miejsce nieco przesunięte w kierunku dziobu w płaszczyźnie diametralnej.
- Przyrząd centralny oraz rurka Pitote'a powinny być instalowane w miejscu, w którym zapewniony jest niski poziom drgań kadłuba i mała amplituda kołysań na fali.
- Pomieszczenie dla logu powinno znajdować się poniżej linii wodnej. Powinny być tam zapewnione odpowiednie warunki środowiskowe, w szczególności odpowiednia wentylacja i dodatnia temperatura. Pomieszczenie powinno być suche i zapewniać odpowiednią powierzchnię dla obsługi oraz umożliwiającą remont logu.
- Należy zapewnić łatwy dostęp do przewodów doprowadzających wodę z rurki Pitote'a do przyrządu centralnego oraz możliwość przedmuchiwania tych przewodów sprężonym powietrzem - w przypadku zanieczyszczenia ich w sposób mechaniczny.
- Szyb, w którym znajduje się zawór denny rurki Pitote'a powinien być wyposażony we właz wodoszczelny, który w trakcie rejsu musi być normalnie zamknięty (zawór logu znajduje się w dnie okrętu i jego uszkodzenie może spowodować dostanie się wody do wnętrza okrętu).

## 2.4. Log indukcyjny

Działanie logu indukcyjnego, jak można wnioskować z nazwy, oparte jest na wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej odkrytej przez Faraday'a. Zjawisko to polega na indukowaniu się siły elektromotorycznej w zamkniętym przewodniku pod wpływem zmiany strumienia magnetycznego. W przypadku logu indukcyjnego oznacza to zależność między prędkością okrętu a siłą elektromotoryczną indukowaną w wodzie morskiej przez elektromagnes zasilany napięciem przemiennym, umieszczony w szczelnej obudowie i wysunięty poza kadłub okrętu.

Jak powyżej wspomniano, siła elektromotoryczna indukuje się wówczas, gdy przewodnik tworzący zamknięty obwód znajduje się w zmiennym strumieniu magnetycznym. Zmiany strumienia elektromagnetycznego w technice uzyskuje się najczęściej poprzez obrót uzwojenia (prądnica) lub zasilanie napięciem zmiennym (transformator) układu wzbudzającego. Trzecim wariantem, stosowanym rzadziej, jest liniowe przemieszczanie uzwojenia w kierunku prostopadłym do linii sił pola magnetycznego. Większość Czytelników powinna pamiętać takie doświadczenie przeprowadzane na lekcjach fizyki w szkole średniej. W przypadku logu elektromagnetycznego mamy do czynienia z trzecim spośród wymienionych przypadków, jednak z przyczyn technicznych, które zostaną wyjaśnione poniżej, konieczne jest również zasilanie układu wzbudzenia napięciem zmiennym.

Zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej, przy ruchu przewodnika w jednorodnym polu magnetycznym indukuje się w nim siła elektromotoryczna, której wielkość określa wyrażenie:

$$E = B l V, \quad (2.11)$$

gdzie:

$E$  - siła elektromotoryczna;



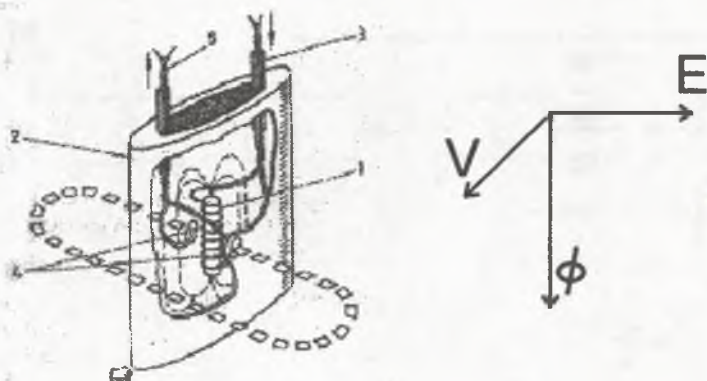
$B$  - indukcja magnetyczna;

$l$  - długość przewodnika;

$V$  - wektor prędkości okrętu.

W logach indukcyjnych elektromagnes wytwarzający pole elektromagnetyczne porusza się wraz z okrętem; natomiast woda morska jest przewodnikiem, ponieważ zawiera jony soli. Powstała w ten sposób siła elektromotoryczna jest proporcjonalna do prędkości przemieszczania się okrętu  $V$ .

Podstawowym elementem logu indukcyjnego jest czujnik, który ma kształt opływowy i jest wysunięty zazwyczaj (od kilku centymetrów do jednego metra) poza kadłub okrętu.



Rys.2.9. Czujnik logu indukcyjnego

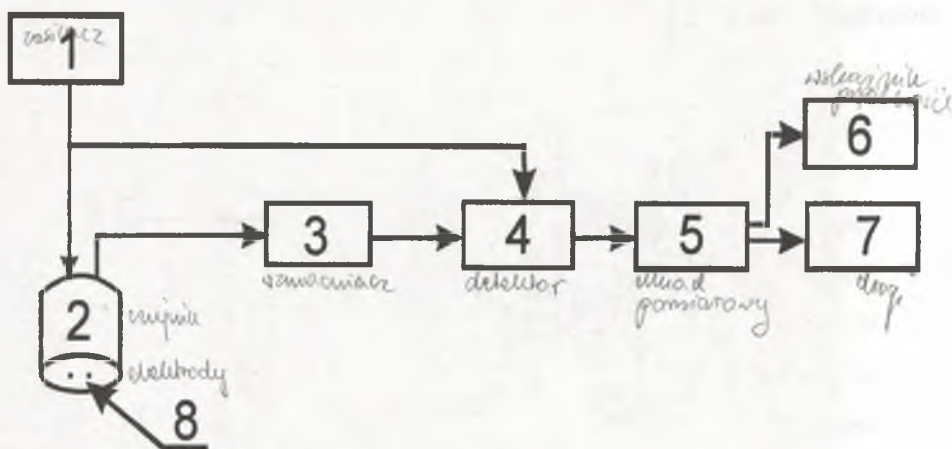
1 – elektromagnes; 2 – obudowa; 3 - przewód zasilający elektromagnes; 4 – elektrody;  
5 – przewody;  $\Phi$  - wektor strumienia magnetycznego;  
 $E$  - wektor siły elektromagnetycznej;  $V$  – wektor prędkości okrętu

Elektromagnes (1) umieszczony w obudowie (2) wykonanej z materiału izolacyjnego montuje się na zewnątrz dna kadłuba. Doprowadzenie prądu do cewki elektromagnesu odbywa się za pomocą przewodu (3). Wokół tegoż elektromagnesu wytwarza się strumień pola magnetycznego, którego obwód

zamyka się przez wodę. Przy ruchu okrętu w wodzie indukuje się siła elektromotoryczna, która wywołuje przepływ prądu między elektrodami (4). Wielkość napięcia indukowanej siły elektromotorycznej (E) jest przekazywana przewodem (5) do wzmacniacza, a stąd do kolejnych układów logu.

W pewnym uproszczeniu zasadę pracy logu indukcyjnego można opisać na podstawie schematu blokowego (rys.2.10).

Zmienne pole elektromagnetyczne wytwarzane jest w wodzie przez czujnik (2) zasilany zmiennym napięciem (najczęściej 50 Hz) z zasilacza (1). Podczas ruchu okrętu napięcie indukowane na elektrodach czujnika - proporcjonalne do prędkości, ale również pozostające w zależności od napięcia zasilającego - zostaje podane z czujnika (2) do wzmacniacza (3), gdzie jest wzmacniane.



Rys.2.10. Uproszczony schemat blokowy logu indukcyjnego  
 1 – zasilacz; 2 – czujnik (przetwornik); 3 – wzmacniacz; 4 – detektor;  
 5 – układ pomiarowy; 6 – wskaźnik prędkości;  
 7 – wskaźnik prędkości i przebytej drogi, 8 – elektrody

Sygnał na wyjściu czujnika stanowi sumę dwóch napięć:

- napięcia użytecznego (synfazowego), które zawiera informację o prędkości okrętu;
- napięcia transformatorowego (kwadraturowego), które indukuje się w wyniku zasilania układu wzbudzenia napięciem przemiennym.



$$E = k_1 V B \sin(\omega t) + k_2 B \cos(\omega t), \quad (2.12)$$

gdzie :

$B$  – indukcja magnetyczna;

$\omega$  – częstotliwość napięcia wzbudzającego;

$k_1, k_2$  – współczynniki proporcjonalności.

Sygnał synfazowy, jak to już wcześniej opisano, powstaje wskutek postępowego ruchu (w strumieniu pola magnetycznego) „ramki” stanowiącej przewodnik. W przypadku opisywanego logu część tej „ramki” stanowią jony soli rozpuszczonych w wodzie morskiej. Dla funkcjonowania takiego logu nie jest konieczne, aby element wytwarzający pole magnetyczne był wzbudzany napięciem przemiennym. Jednak, gdyby pole magnetyczne było wytwarzane za pomocą napięcia stałego, nastąpiłby jednokierunkowy przepływ jonów do elektrod, co w konsekwencji - w wyniku zjawiska elektrolizy - spowodowałoby osadzenie się jonów soli na jednej z elektrod oraz jej izolację od wody morskiej. W takim przypadku urządzenie przestałoby funkcjonować, bowiem przerwany zostałby obwód elektryczny, w którym ma indukować się siła elektromotoryczna. Aby tego uniknąć, stosuje się wzbudzenie prądem przemiennym. W tej sytuacji pojawia się dodatkowa przyczyna indukowania się siły elektromotorycznej - zmienne pola magnetyczne będące wynikiem wzbudzania elektromagnesu nie prądem stałym lecz przemiennym. Jest to znane zjawisko wykorzystane w budowie transformatora. Jednakże indukowana w ten sposób siła elektromotoryczna jest przesunięta o  $90^\circ$  w fazie względem napięcia wzbudzającego, a więc tej części sygnału, która zawiera użyteczną informację o prędkości okrętu.

Dalsze przetworzenie sygnału wymaga uprzedniego wodrębnienia sygnału użytecznego, co odbywa się w detektorze (4). Następnie, układ pomiarowy (5), we współczesnych logach indukcyjnych funkcjonujący zazwyczaj na bazie technologii cyfrowej, dokonuje pomiaru wartości napięcia na wyjściu z dekodera

i przeliczenia go na prędkość oraz przebytą drogę. Informacja ta w postaci cyfrowej przekazywana jest na wyświetlacze prędkości lub prędkości i przebytej drogi.

Oczywiście, opisany powyżej schemat jest prawdziwy w przypadku logu jednoskładnikowego. Schemat logu dwuskładnikowego jest zdublowany, jedynie układ zasilacza oraz przetwornik pozostają wspólne, jakkolwiek w istocie czujnik wyposażony jest w dwa układy przetworników w jednej obudowie. Czujniki pomiarowe takich logów posiadają dwie pary elektrod pomiarowych umieszczonych prostopadle względem siebie, a rejestrowane przez elektrody napięcia po przetworzeniu wyświetlane są jako wielkości składowych wzdłużnej i poprzecznej prędkości oraz przebytej przez okręt drogi.

Logi indukcyjne są bardziej czułe od ciśnieniowych. Można nimi dokładniej mierzyć małe prędkości okrętu a także prędkość jego ruchu na boki i do tyłu.

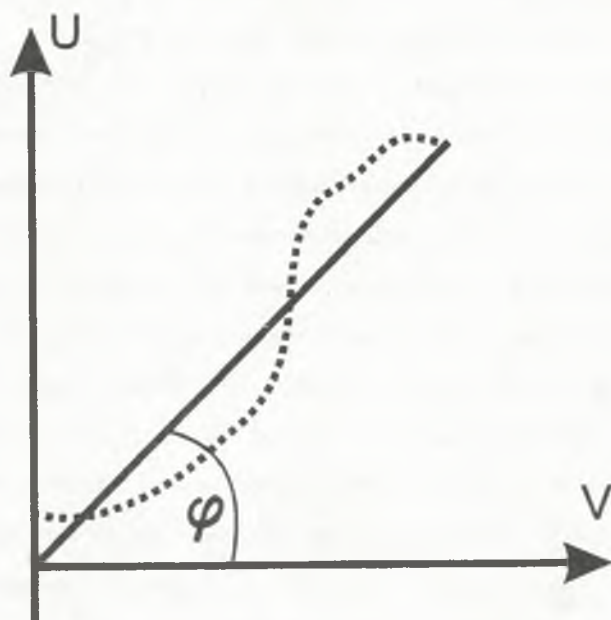
Obecnie na okrętach MW RP logi indukcyjne mają zdecydowaną przewagę nad pozostałymi rodzajami tych urządzeń. Na większości okrętów zamontowane i wykorzystywane są logi dwuskładowe typu BR - 4601 oraz jednoskładnikowe z serii IEŁ (IEŁ-1, IEŁ-2, IEŁ-2M).

Ze wzoru (2.12) można wywnioskować, że zależność napięcia sygnału użytecznego od prędkości czujnika indukcyjnego względem wody  $U = f(V)$  jest prostoliniowa, tak jak przedstawiono ją na rys. 2.11. Nachylenie tej prostej jest jednoznaczne z charakterystyką logu i może być opisane zależnością:

$$S = \frac{U}{V} \quad (\mu V/\text{węzeł}). \quad (2.13)$$

Taka zależność jest jednak prawdziwa tylko w przypadku warunków idealnych i nie uwzględnia wielu czynników hydrodynamicznych zależnych od konstrukcji czujnika indukcyjnego, miejsca jego zamontowania pod kadłubem, wysunięcia poza dno okrętu itp. W rzeczywistości zobrazowaniem zależności sygnału użytecznego od prędkości okrętu  $U = f(V)$  nie jest prosta. Przebieg

takiej krzywej określa się w warunkach rzeczywistych metodami eksperymentalnymi opisanymi w rozdziale 4.



Rys. 2.11. Zależność zmiany sygnału użytecznego logu elektromagnetycznego od prędkości okrętu

Do podstawowych czynników mających wpływ na dokładność wskazań logów elektromagnetycznych należą:

- wspomniane powyżej miejsce zamontowania czujnika pod kadłubem okrętu, a także stan tegoż kadłuba; wiąże się to z turbulentnym przepływem wody w warstwie przyściennej kadłuba oraz z nierównomiernym rozkładem indukcji magnetycznej; czynniki te wywołują nieliniową zależność między wartościami prędkości mierzonej i prędkości aktualnej okrętu;
- przechyły boczne okrętu; błąd pomiaru może być nawet rzędu 1,0 węzła;

- zjawisko polaryzacji elektrod, które mimo wykorzystania zmiennego pola elektromagnetycznego nie zanika zupełnie; powoduje to przesunięcie fazowe w obwodzie wyjściowym urządzenia odbiorczego.

Do kompensacji i minimalizowania wyżej wymienionych błędów służą specjalne układy kompensujące, które nie będą w tym rozdziale omawiane. Należy zwrócić uwagę na to, że układy opisywanego logu charakteryzują się niewielką bezwładnością w porównaniu ze zmiennością prędkości okrętu. W efekcie logi takie są w stanie zarejestrować nawet najmniejsze różnice prędkości okrętu do tego stopnia, że w warunkach wzmożonego falowania morza zdarzają się trudności z odczytaniem średniej prędkości okrętu wskutek jej bardzo częstych zmian. Z tych względów w układach logów indukcyjnych umieszcza się zazwyczaj układy filtrujące, które mają uśredniać pomiary. Wielkość błędów tego typu logu zależeć będzie od (oprócz czynników podanych powyżej) dokładności regulacji systemu. Przyjmuje się, że gdy stan morza nie przekracza 4° w skali Beauforta, prędkość mierzona logiem elektromagnetycznym określana jest z dokładnością około  $\pm 0,2$  węzła, a przebyta droga - do 1%.

W tabeli 2.2 dokonano porównania danych technicznych wybranych logów indukcyjnych stosowanych w Marynarce Wojennej RP.

Dynamiczny rozwój logów elektromagnetycznych, jaki został odnotowany w ostatnim dwudziestoleciu, wynika z faktu, iż w porównaniu z innymi logami mają one wiele zalet. Najważniejsze z nich są następujące:

- brak części ruchomych w układzie pomiarowym, co ułatwia przeglądy i konserwację;
- szeroki zakres pomiaru prędkości do przodu a także wstecz;
- możliwość budowy układów pomiarowych i pomiaru składowych prędkości bocznych;
- nieskomplikowane zerowanie wskaźników i kalibracje;
- możliwość stosowania powtarzaczy wskazań wykonanych techniką cyfrową;



- łatwość formowania sygnału prędkości, co umożliwia współpracę z innymi urządzeniami nawigacyjnymi;
- niezależność dokładności pomiaru prędkości od wahań napięcia, częstotliwości zasilania oraz właściwości wody morskiej, tzn. zasolenia i temperatury.

Tabela 2.2. Porównanie danych technicznych wybranych logów indukcyjnych

| Lp. | Nazwa logu<br>Parametr                           | BR - 4601 | IEL - 1                | IEL - 2             |
|-----|--------------------------------------------------|-----------|------------------------|---------------------|
| 1   | 2                                                | 3         | 4                      | 5                   |
| 1.  | Zakres pomiarowy:                                |           |                        |                     |
|     | - prędkość wzdłużna do przodu [w.]               | 0 - 39,9  | 0 - 80                 | 0 - 30              |
|     | - prędkość wzdłużna do tyłu [w.]                 | 0 - 15    | -                      | 0 - 10              |
|     | - prędkość poprzeczna $V_Y$ na burty [w.]        | 0 - 9,9   | -                      | -                   |
| 2.  | Błąd pomiaru prędkości [w.]                      | $\pm 0,3$ | $(\pm 0,1 - \pm 0,35)$ | $\pm 0,1 - \pm 0,2$ |
| 3.  | Błąd pomiaru przebytej drogi                     | $\pm 2\%$ | $\pm 0,02$ Mm          | -                   |
| 4.  | Skala dokładności odczytu przebytej drogi [mile] | 0,01      | 0,1                    | 0,02                |

## 2.5. Log geoelektryczny

Specyficzną odmianą logu indukcyjnego jest log geoelektryczny. Jego funkcjonowanie oparte jest na zjawisku indukcji, jednak pole magnetyczne nie jest w tym przypadku wytwarzane przez układy logu. Wykorzystuje się bowiem stałe pole magnetyczne Ziemi. Dzięki temu log geoelektryczny może określać



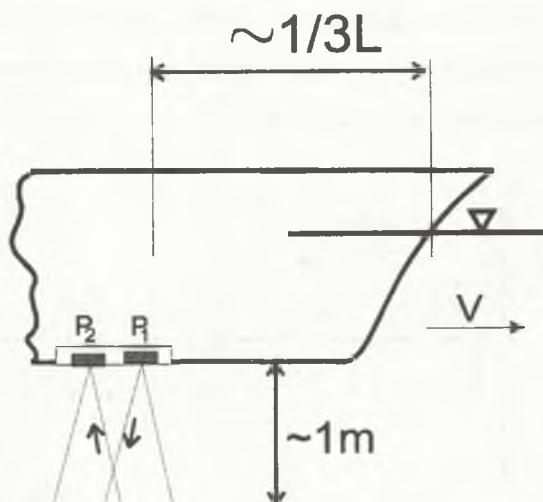
prędkość w odniesieniu do Ziemi a nie względem wody. Jeśli elektrody logu (które zwykle w tym przypadku mają formę stosunkowo długich przewodów) przemieszczają się w polu magnetycznym, wówczas następuje zmiana strumienia magnetycznego, co powinno skutkować indukowaniem się siły elektromotorycznej. Istotnie jest tak, jednakże siła ta okazuje się niewielka, gdyż natężenie pola magnetycznego nie jest zbyt duże.

Zasadniczą trudność w przypadku funkcjonowania tego typu logów stanowi zakłócający wpływ wytwarzanego przez okręt pola magnetycznego, którego poziom jest porównywalny z ziemskim. W związku z tym elektrody powinny być holowane za okrętem w takiej odległości, aby to oddziaływanie zminimalizować (długość holu powyżej 20 m).

Kolejnym utrudnieniem jest stała polaryzacja pola magnetycznego Ziemi. Wskutek tego biegunowość elektrod jest niezmienna, a to oznacza stopniową ich jonizację wskutek osadzania się na nich jonów soli. Jest to zjawisko negatywne powodujące spadek sprawności logu. W konsekwencji zaleta logu geoelektrycznego, czyli pomiar względem Ziemi (log prędkości bezwzględnej) jest niweczona przez niedoskonałości eksploatacyjne, jakimi są niewielka dokładność oraz trudności eksploatacyjne - jonizacja elektrod oraz ograniczanie manewrowości jednostki przez holowane elementy logu. Dlatego też log geoelektryczny nie jest stosowany w okrętownictwie, a znajduje sporadycznie zastosowanie w badaniach naukowych.

## 2.6. Log korelacyjny

Logi korelacyjne należą do najnowszej generacji logów; mierzą prędkość względną za pomocą elementów hydroakustycznych poprzez określenie czasu, jaki upłynie pomiędzy wysłaniem sygnału przez przetwornik  $P_1$  a odebraniem go przez przetwornik  $P_2$ . Zasadę pracy tych urządzeń obrazuje rysunek 2.12.

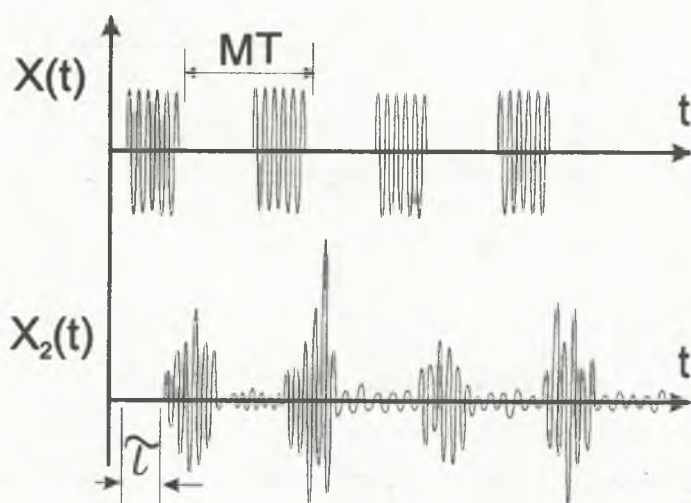


Rys. 2.12. Zasada działania logu korelacyjnego

Log korelacyjny pod względem budowy przypomina echosondę o impulsowym charakterze pracy, wyposażoną w umiejscowione w dnie okrętu dwa przetworniki piezoelektryczne odległe od siebie o odcinek  $S$  zwykle o długości kilkunastu centymetrów. Jeden z przetworników spełnia rolę nadawczego, a drugi - odbiorczego.

Przetwornik  $P_1$  emituje w kierunku dna falę hydroakustyczną  $X(t)$ . Część energii odbitej od zanieczyszczeń i pęcherzyków gazowych występujących w wodzie (rewerberacja) odbierana jest przez przetwornik  $P_2$ . Jednocześnie bezpośrednio z toru nadawczego do odbiorczego podawany jest sygnał. Pomiar prędkości polega na określeniu czasu, jaki upłynął od wysłania do odebrania sygnału dźwiękowego, poprzez ustalenie czasu korelacji pomiędzy obydwoma sygnałami (nadanym i odebranym), a następnie przeliczenie czasu na prędkość - przy założeniu niezmienniej długości bazy pomiarowej (odległości pomiędzy przetwornikami). Odebrany sygnał  $X_2(t)$  teoretycznie powinien być identyczny z sygnałem wysyłanym przez przetwornik nadawczy, jednak w rzeczywistości ulega zniekształceniom (rys. 2.13). Określenie czasu korelacji dwóch sygnałów oznacza w istocie ustalenie wartości, o jaką należy przesunąć w dziedzinie czasu

wysyłany przez przetwornik  $P_1$  sygnał, by jego przebieg w największym stopniu był zbliżony do przebiegu sygnału odebranego. W praktyce dokonuje się porównania momentów występowania charakterystycznych wartości obu funkcji - zazwyczaj przejścia przez punkt zero.



Rys.2.13. Wykresy sygnałów logu korelacyjnego

Układ autokorelacji realizuje następującą funkcję:

$$R(\tau) = \frac{1}{MT} \cdot \int_0^{MT} X(t) \cdot X_2(t - \tau) dt, \quad (2.14)$$

gdzie:

$R(\tau)$  – funkcja korelacji;

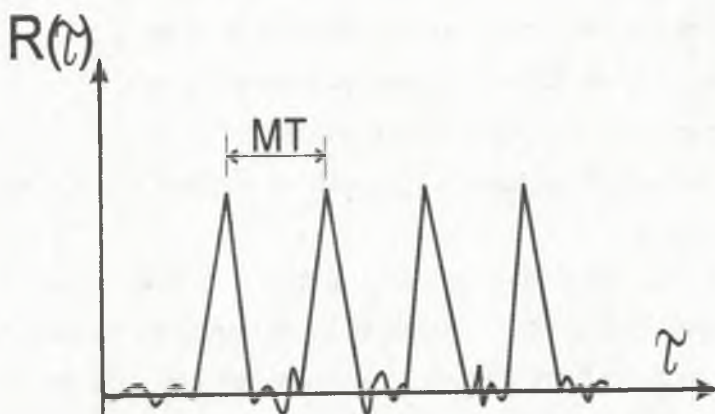
$\tau$  - czas opóźnienia;

$M$  – ilość okresów fali w przedziale całkowania;

$T$  - okres promieniowanej fali hydroakustycznej.

Wykres funkcji (2.14) zaprezentowano na rys. 2.14. Charakterystyczne są tu pojedyncze duże wartości odpowiadające występowaniu korelacji oraz bliskie

zeru wartości charakterystyczne dla pozostałych przypadków. Okres tej funkcji równa się okresowi impulsowania w logu. Istota działania tego urządzenia polega na ustaleniu wartości  $\tau$  czasu, o jaki należy opóźnić sygnał przekazany bezpośrednio z generatora, aby był najbardziej zgodny z sygnałem odebrany przez przetwornik odbiorczy. Czas ten jest w oczywisty sposób zależny od długości odcinka  $S$  pomiędzy przetwornikami - drogi, jaką przebył dźwięk w wodzie oraz drogi, jaką pokonał w tym czasie okręt. Część tych wielkości nie ulega zmianie, a w szczególności odległość przetworników  $S$  i częstość wysyłania impulsów. Odległość, na jakiej następuje zjawisko rewerberacji jest określana metodą prób. Wprawdzie ulega ona niewielkim zmianom, jednak przyjmowana jest za stałą dla danego egzemplarza logu w trakcie eksploatacji. W efekcie więc można przyjąć, że zmiany czasu korelacji sygnałów  $\tau$  następują wskutek ruchu okrętu.



Rys.2.14. Wykres funkcji korelacji

Można stwierdzić, że czas korelacji  $\tau$  wynika z drogi, jaką winien pokonać przetwornik odbiorczy do miejsca, w którym znajdował się przetwornik nadawczy w momencie wysłania sygnału sondującego. Dlatego odnajdując przesunięcie sygnału odebranego względem nadanego można określić prędkość okrętu z prostej zależności:



$$V = \frac{S}{\tau}, \quad (2.15)$$

gdzie:

$\tau$  - czas korelacji;

$S$  - stała odległość między przetwornikami.

Ostatecznie zatem dochodzimy do wniosku, że pomiar prędkości jest prosty. Problem jednak polega na dużej ilości obliczeń wymaganych do ustalenia czasu korelacji  $\tau$ . Jest to w praktyce wykonalne tylko na szybkich cyfrowych układach liczących. Stanowi to wyjaśnienie faktu, że logi takie mogły pojawić się dopiero w latach dziewięćdziesiątych.

Z postaci wzoru (2.15) wynika w sposób oczywisty, że funkcja opisująca zależność prędkości okrętu i czasu korelacji jest liniowa. Jednak, podobnie jak w przypadku poprzednio omawianych logów, zależność ta jest uproszczeniem. Nie uwzględnia ona bowiem wpływu następujących czynników:

- zmiany odległości, na której następuje rewerberacja;
- nieliniowości przepływu wody pod kadłubem;
- niedokładności obliczeń związanych na przykład z wpływem efektu Dopplera.

Teoretycznie sygnał odbity powinien mieć tę samą częstotliwość co sygnał wysłany. Jednak skutek efektu Dopplera nie jest to prawdą; ponadto efekt ten jest inny przy różnych prędkościach, z czym muszą być związane trudności obliczania korelacji dwóch sygnałów o różnych częstotliwościach. Dlatego też, podobnie jak inne, log korelacyjny nie różni się od dowolnego przyrządu pomiarowego, bowiem także dokonuje pomiarów z określonymi błędami. Zasadnicza różnica jednakże polega na tym, że układy logu korelacyjnego są w istocie pewnego rodzaju komputerem. Istnieją więc możliwości dokładniejszego zniwelowania błędów metodami programowymi. Jedną z nich jest metoda tablicowa polegająca na wprowadzeniu do programu wielu wartości poprawek przypisanych konkretnym wartościom wskazywanym przez log. Urządzenie dodawałoby poprawki do wartości zmierzonych wyświetlając wynik



zmodyfikowany. Rozwiązanie takie jest bardzo nieekonomiczne nie tylko ze względu na znaczną ilość niezbędnych do zapamiętania wartości – zakładając, że poprawka byłaby określana co jeden węzeł, tablica taka miałaby najwyżej kilkadziesiąt elementów. Zasadniczym problemem byłaby ponownie konieczność przeprowadzenia prób na wielu prędkościach.

Lepszym sposobem jest opisanie krzywej błędów funkcją matematyczną posiadającą kilka parametrów.

$$\sigma V = f(a, b, c, d, \dots), \quad (2.16)$$

gdzie:

$\sigma V$  – błąd logu;

$a, b, c, d, \dots$  - współczynniki równania błędów.

Na podstawie powyższych parametrów układy logu obliczać będą wartość poprawki dla dowolnej prędkości. Opis matematyczny tej zależności jest obecnie tajemnicą producentów (tzw. *know-how*) i nie spotyka się jeszcze dokładniejszych opisów tego zagadnienia. Można jedynie zwrócić uwagę, że zazwyczaj przeprowadza się pomiary dla trzech prędkości, z czego można wnosić, iż ilość zmiennych w takim równaniu nie powinna być większa niż trzy.

## 2.7. Log hydroakustyczny

Zasada działania logów hydroakustycznych oparta jest na wykorzystaniu zjawiska Dopplera (z tego względu są one często nazywane dopplerowskimi). Zjawisko to polega na zmianie częstotliwości odbieranej fali, gdy źródło tej fali i odbiornik znajdują się względem siebie w ruchu, a więc oznacza zmianę częstotliwości sygnału odbieranego (echa) spowodowanej ruchem przeszkody lub nadajnika.

Przy zmniejszaniu się odległości między źródłem fali i odbiornikiem (wzajemne zbliżanie się) częstotliwość odbieranej fali wzrasta, a przy oddalaniu maleje. Zjawisko Dopplera odnosi się do propagacji fal, bez względu na ich charakter, środowisko, w którym się rozprzestrzeniają i zakres częstotliwości. Logi dopplerowskie najczęściej funkcjonują w zakresie częstotliwości akustycznych, jednak znane są również działające na bazie fal radiowych. Z powodu szerszego zastosowania zakresu akustycznego oraz generowania fali do wody logi takie nazywane bywają również hydroakustycznymi.

W przypadku przekazywania fali akustycznej pomiędzy ruchomymi obiektami częstotliwość odebranego sygnału wynosi:

$$f_0 = f \cdot \frac{C - (V_p - V_0)}{C + (V_p - V_0)}, \quad (2.17)$$

gdzie:

$f$  - częstotliwość fali wysyłanej przez nadajnik;

$C$  - prędkość dźwięku w wodzie;

$V_p$  - rzut prędkości odbiornika na prostą łączącą źródło dźwięku i odbiornik;

$V_0$  - rzut prędkości nadajnika na prostą łączącą źródło dźwięku i odbiornik.

Jak wynika z zależności (2.17), częstotliwości sygnału odebranego i sygnału wysyłanego różnią się w zależności od prędkości wzajemnego przemieszczania się nadajnika i odbiornika. Zakres zmian częstotliwości odbieranej zależy od uwzględnianego przedziału prędkości oraz częstotliwości  $f$  stosowanej w systemie.

Tabela 2.3. Przykładowe wartości zmiany częstotliwości wskutek efektu Dopplera  
[kHz]

| $V$ [w.] | $f=30$ [kHz] | $f=200$ [kHz] |
|----------|--------------|---------------|
| 0        | 0            | 0             |
| 10       | 0.2          | 1.4           |
| 20       | 0.4          | 2.7           |
| 30       | 0.6          | 4.0           |

Dla zobrazowania powyższych zmian przedstawiono (tab. 2.3) odbierane częstotliwości dla dwóch wartości częstotliwości nadawanej  $f$ . Kanał odbiorczy musi zapewnić przeniesienie odpowiednio szerokiego pasma częstotliwości, bowiem w innych urządzeniach hydroakustycznych, na przykład echosondach, pasmo przenoszenia może być ograniczone do kilkuset Hertzów. Natomiast w przypadku logów, szczególnie w sytuacji zastosowania wyższych częstotliwości, pasmo to musi obejmować kilka kHz.

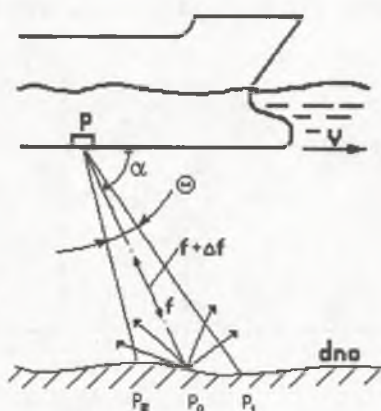
Przy uwzględnieniu  $V_p = 0$  zależność (2.17) przyjmuje postać:

$$f_0 = f \cdot \frac{C+V}{C-V} = f \cdot \frac{1+\frac{V}{C}}{1-\frac{V}{C}}, \quad (2.18)$$

gdzie

$V$  - wektor prędkości okrętu.

Zasada funkcjonowania logu dopplerowskiego została w uproszczeniu przedstawiona na rys. 2.15. Umieszczony w dnie okrętu przetwornik P emituje falę akustyczną w formie wiązki o kącie bryłowym  $\Theta$  w kierunku dna morskiego. Oś wiązki promieniowania nachylona jest pod kątem  $\alpha$  w stosunku do wektora prędkości okrętu  $V$ .



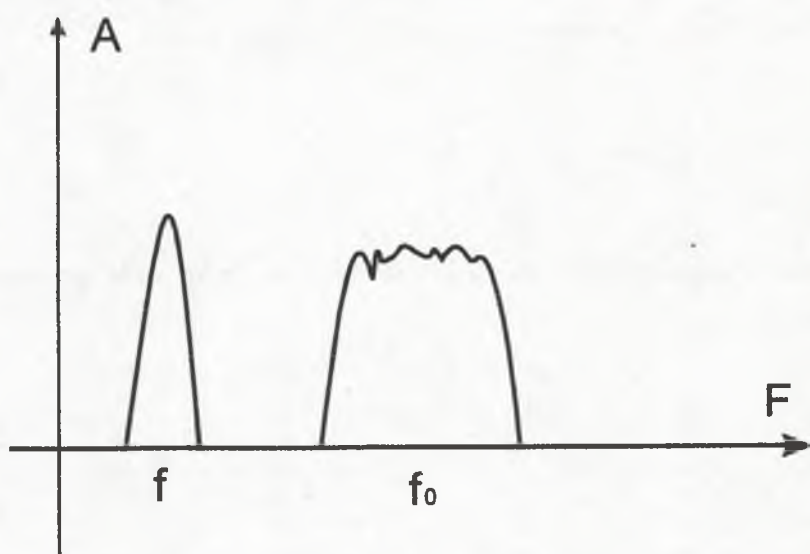
Rys.2.15. Zasada pracy logu hydroakustycznego jednoskładnikowego  
 P – przetwornik;  $P_0$  - środkowy punkt odbicia od dna;  
 V - wektor prędkości postępowej okrętu;  
 $\Theta$  - rozwartość charakterystyki antenowej przetwornika;  
 $\alpha$  - odchylenie osi wiązki antenowej od płaszczyzny horyzontu

Wskutek efektu Dopplera omawiana fala docierając do dna morskiego cechuje się inną częstotliwością niż fala wysłana. Ponadto należy zwrócić uwagę, iż wskutek rozchodzenia się dźwięku w obrębie kąta bryłowego  $\Theta$ , w różnych punktach dna oświetlanego tym sygnałem zarejestrować można inne częstotliwości docierającej fali akustycznej. Wynika to z faktu, że każdy promień dźwięku wyprowadzony z przetwornika w obrębie wiązki będzie nachylony względem wektora  $V$  pod innym kątem z przedziału od  $\Theta + \alpha$  do  $\Theta - \alpha$ . Energia akustyczna o tak różnych częstotliwościach odbita od dna dociera ponownie do okrętu, przy czym znów ulega zmianie jej częstotliwość, gdyż każdy punkt dna morskiego odbijający tę energię może być traktowany jak przetwornik nadawczy nieruchomy względem okrętu. Częstotliwość odebranego sygnału będzie więc dwukrotnie przesunięta - każdorazowo w tę samą stronę.

Dopplerowska różnica częstotliwości  $\Delta f$  zależy od częstotliwości emisji  $f$  oraz składowej prędkości  $V$  wzdłuż kierunku ograniczonego szerokością emitowanej wiązki. Wiązka ta jest ograniczona kątem bryłowym  $\Theta$ , w związku z tym częstotliwość dopplerowska  $f_0$  będzie proporcjonalna do wartości  $\cos(\alpha \pm \Theta/2)$ . Jest to stosunkowo niewielka rozbieżność, dlatego nie zostanie



uwzględniona w dalszej części rozdziału. Jednakże konstruktor logu dopplerowskiego musi ten problem brać pod uwagę. Aspekt ten oznacza bowiem rozmycie odbieranego pasma oraz dużą zmienność amplitudy odbieranych fragmentów pasma, ponieważ poziom sygnału odbitego zależy w dużym stopniu od kąta padania a także od rodzaju materiału odbijającego. Wszystko to powoduje niejednoznaczność w trakcie pomiaru częstotliwości dopplerowskiej, któremu towarzyszy pytanie, która z częstotliwości odbieranego zakresu fal jest właściwą (rys. 2.16). Dla celów wykładu założono, że znamy częstotliwość odpowiadającą głównemu kierunkowi promieniowania  $\alpha$ .



Rys.2.16. Porównanie pasma sygnału nadawanego i odebranego bez uwzględnienia rzeczywistych mocy

Po rozłożeniu funkcji (2.18) w szereg Taylora otrzymuje się następującą zależność :

$$f_0 = f \cdot \left( 1 + \frac{2V}{C} + \frac{2V^2}{C^2} + \frac{2V^3}{C^3} + \dots + \frac{2V^n}{C^n} \right). \quad (2.19)$$



Z zależności (2.19) wynika, że zmiany częstotliwości odebranej w stosunku do nadawanej nie zależą liniowo od prędkości  $V$ . Uwzględniając jednak, że  $V$  jest znacznie mniejsze od  $C$ , w zależności (2.19) można pominąć składowe wyższego rzędu i wtedy dopplerowska różnica częstotliwości  $\Delta f$  może być opisana zależnością:

$$\Delta f = f_0 - f = \frac{2V}{C} \cdot f. \quad (2.20)$$

Jeżeli fala ultradźwiękowa jest emitowana pod kątem  $\alpha$  do kierunku wektora prędkości obiektu, to wyrażenie (2.20) przyjmie postać:

$$\Delta f = 2 \frac{f}{C} \cdot V \cdot \cos \alpha. \quad (2.21)$$

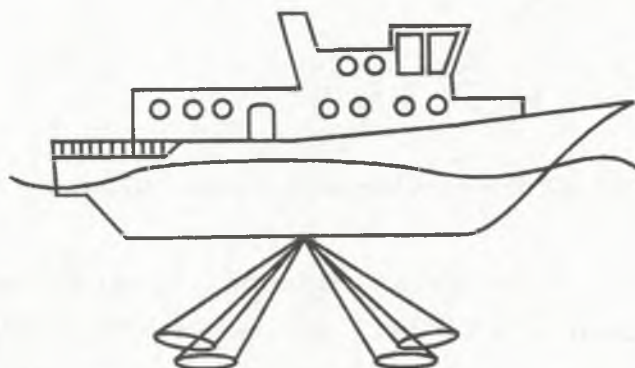
Przekształcając zależność (2.21) możemy otrzymać wzór na prędkość okrętu:

$$V = \frac{\Delta f \cdot C}{2 f \cdot \cos \alpha}. \quad (2.22)$$

Z zależności (2.22) wynika, że w logu hydroakustycznym problem dokładności pomiaru prędkości oraz (po scałkowaniu) pomiaru przebytej drogi polega głównie na dokładnym zmierzeniu różnicy częstotliwości sygnału nadanego i odebranego - czyli dopplerowskiej różnicy częstotliwości  $\Delta f$ .

Przy zastosowaniu jednowiązkowego promieniowania mamy możliwość zmierzenia tylko jednej składowej (zazwyczaj wzdłużnej) prędkości okrętu. W sytuacji występowania dryfu i znosu droga okrętu nie będzie pokrywała się z płaszczyzną symetrii okrętu. Dla określenia prędkości okrętu względem dna konieczne jest również uwzględnianie składowej poprzecznej. Ponadto w praktyce morskiej należy zwrócić uwagę na trudności z zachowaniem stałej

wartości kąta  $\alpha$  w związku z kołysaniem się okrętu. Wymagałoby to zastosowania precyzyjnej stabilizacji przetworników. Prostszy rozwiązaniem okazało się zastosowanie układów wielowiązkowych, które zapewniają dużą dokładność i możliwość pomiaru dwóch składowych prędkości. Szczególnie atrakcyjny jest układ czterowiązkowy, który znalazł szerokie zastosowanie w eksploatowanych logach hydroakustycznych.

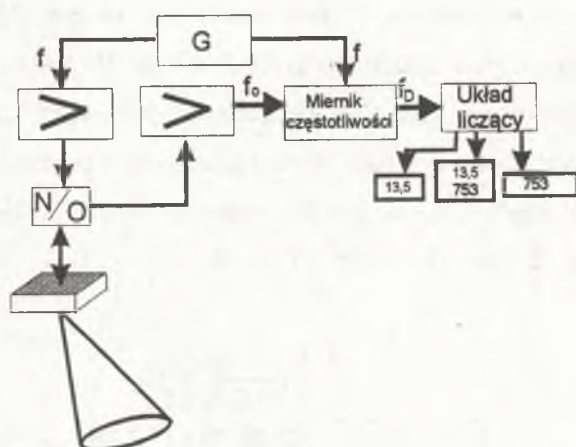


Rys. 2.17. Typowy układ wiązek logu hydroakustycznego

Rozwiązanie wielowiązkowe posiada tę zaletę, że w przypadku symetrycznego rozmieszczenia wiązek przechył powoduje zwiększenie kąta nachylenia osi jednej wiązki o tę samą wartość, o jaką zmniejsza się nachylenie osi wiązki symetrycznej. Wystarczy więc obliczyć wartość średnią z obu, aby pomimo przechyłu znać dokładną wartość. Szczególnie atrakcyjne jest rozmieszczenie wiązek w kierunkach interkardynalnych względem płaszczyzny diametralnej. W takim bowiem przypadku można obliczać średnią wartość składowej wzdłużnej i poprzecznej z czterech pomiarów, każdorazowo biorąc odpowiednie ich kombinacje. Dzięki temu zwiększa się precyzja pomiaru.

Uproszczony schemat logu hydroakustycznego przedstawia rysunek 2.18.

Generator (G) wytwarza przebiegi napięciowe o częstotliwości wzorcowej  $f$ , które po odpowiednim wzmocnieniu we wzmacniaczu mocy zostają podane do przetwornika za pośrednictwem przełącznika nadawanie - odbiór (N/O).



Rys 2.18. Schemat blokowy logu hydroakustycznego

W niniejszym przykładzie rozważamy najprostszy wariant logu hydroakustycznego – z jednym przetwornikiem. W przypadku logów wieloskładnikowych sygnał z generatora podawany jest jednocześnie na wszystkie przetworniki.

Odbita od dna morskiego energia ultradźwiękowa o zmienionej częstotliwości ( $f_0$ ), niosąca informację o prędkości okrętu, jest odbierana przez ten sam przetwornik i zamieniana na energię elektryczną. Energia ta, ponownie przez przełącznik N/O podana zostaje na wzmacniacz, a następnie na układ wydzielania dopplerowskiej różnicy częstotliwości ( $\Delta f$ ). Napięcie zmienne o tej częstotliwości podane zostaje na układ liczący, gdzie następuje obliczenie prędkości i przebytej drogi, a w przypadku logów wieloskładnikowych – również składowych prędkości, kierunku ruchu (naprzód-wstecz, lewo-prawo) oraz kąta dryfu. Obliczana w tym układzie informacja jest wyświetlana (zazwyczaj w postaci cyfrowej) na wielu powtarzaczach.

Logi hydroakustyczne są powszechnie stosowanymi logami prędkości bezwzględnej. Najczęściej pomiar odbywa się względem dna, jednak w szczególnych przypadkach, zwłaszcza przy dużych głębokościach, dokonuje się go nie - względem sygnału odbitego od dna lecz sygnału odbitego od objętości wody pod dnem okrętu (rewerberacja). W takiej sytuacji oczywiście

mierzona prędkość nie jest rzeczywistą, bowiem jej pomiaru dokonuje się względem wody.

Z zależności (2.22) wynika, że w logu hydroakustycznym problem dokładności pomiaru prędkości oraz (po scałkowaniu) przebytej drogi polega głównie na dokładnym zmierzeniu różnicy częstotliwości sygnału nadanego i odebranego. Zasadnicze czynniki wprowadzające zakłócenia do tego pomiaru są następujące:

- szerokość wiązki, w której nadawany jest sygnał;
- rozmycie widma sygnału odbieranego wskutek skomplikowanej struktury dna morskiego oraz wpływu zanieczyszczeń w wodzie;
- zmienne warunki propagacji dźwięku;
- niedoskonałość układów elektronicznych logu, zwłaszcza miernika częstotliwości;
- niedoskonałość wykonania oraz montażu względem kadłuba bloku przetworników (błędy kąta).

Istotnym źródłem błędów pomiaru za pomocą logów hydroakustycznych są zmiany temperatury wody i jej zasolenia. W wielu logach wpływ ten w dużym stopniu jest niwelowany poprzez automatyczną regulację kąta  $\alpha$  w funkcji prędkości rozchodzenia się fali akustycznej  $C$  w wodzie dokonywaną za pomocą układu zachowującego stałość ilorazu  $\cos\alpha/C$ .

Na dokładność pomiaru prędkości i przebytej drogi, oprócz warunków, jakie stwarza środowisko wody morskiej, także ma wpływ błąd wynikający ze sposobu pomiaru sygnału. Sygnał zawierający informację o prędkości - doprowadzony do elektronicznego układu przetwarzania - zawiera szereg nieużytecznych sygnałów zakłócających. W takiej właśnie postaci zostaje poddany przetworzeniu, którego wynik zawiera błąd. Głównymi przyczynami tegoż błędu są:

- szerokość widma częstotliwości emitowanego sygnału; widmo to w przypadku pracy impulsowej jest przyczyną błędu w pomiarze częstotliwości dopplerowskiej; średni błąd kwadratowy częstotliwości dopplerowskiej (wprowadzany z tego powodu) wynosi:



$$F_w = \frac{1}{4T}, \quad (2.23)$$

gdzie

$T$  - czas trwania impulsu;

- występowanie zakłóceń; pomiar częstotliwości dopplerowskiej przy zakłóceniach w sygnale odbywa się również z błędem, którego średniokwadratowa wielkość zbliżona jest do poprzedniego i wynosi:

$$F_z = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (2.24)$$

gdzie

$N$  - stosunek sygnału użytecznego do sygnału zakłócającego;

- rozmycie widma sygnału pomiarowego; według zależności (2.22) częstotliwość dopplerowska jest funkcją kierunku emitowanych fal akustycznych; szerokość wiązki promieniowania wprowadza więc wokół częstotliwości dopplerowskiej tym szersze widmo częstotliwości, im większy jest kąt promieniowania wiązki; cała gama tak tworzonych sygnałów ulega odbiciu od dna, które nie jest zwierciadłem; wskutek złożonego kształtu oraz zmiennych własności odbijających odbierany sygnał nie jest monochromatyczny, lecz ma stosunkowo szerokie i bardzo rozmyte widmo; otrzymany stąd błąd względny pomiaru częstotliwości dopplerowskiej  $\Delta F$  określany jest zależnością:

$$\frac{\Delta F}{\Delta f} = \sqrt{2 \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\cos \alpha}}, \quad (2.25)$$

gdzie

$\theta$  - szerokość wiązki;

na przykład, dla  $\theta = 2^\circ$  i  $\alpha = 60^\circ$  względny błąd pomiaru  $\Delta F$  wynosi  $\pm 1,6\%$ ;



- wpływ ruchu kadłuba okrętu; w wyniku kołysań wzdłużnych i poprzecznych zmienia się kąt  $\alpha$  głównego promieniowania fali; jest to przyczyną powstawania błędów; na przykład, przechyły okrętu o  $\pm 5^\circ$  powodują, że względny błąd pomiaru prędkości wynosi około  $\pm 0,5\%$ ; zakłada się, że wielkość kąta przechyłu okrętu podzielona przez 10 określa wielkość tego błędu; matematycznie częstotliwość opisuje się zależnością:

$$\Delta F = 4 \frac{V}{C} = \Delta f \cos \alpha \cos \vartheta, \quad (2.6)$$

gdzie

$\vartheta$  - kąt przechyłów bocznych okrętu;

- rodzaj wody w akwenie pływania; w instrukcjach logów hydroakustycznych zaznacza się, że podczas pływania po akwenach słodkowodnych wartości poprzednio opisywanych błędów są podwyższone o 3% i otrzymany wynik należy pomnożyć przez współczynnik 0,97.

Dużą rolę odgrywają błędy bezwzględne logu powstałe wskutek małych prędkości okrętu, np. podczas manewrów czy nawigacji po płyciznach. Mierzone prędkości są nieduże i dlatego pojawia się potrzeba znacznego obniżenia progu czułości aparatury.

Prędkość bezwzględna mierzona jest zwykle przy głębokościach wody do około 400 metrów pod stępką. Zakres głębokości zależy od jakości dna morskiego i warunków akustycznych oraz typu logu.

Wprawdzie wspomniano wcześniej, że użycie układów wielowiązkowych pozwala uzyskać wysokie dokładności pomiaru, jednak odchylenia osi pionu okrętu od kierunku pionu wprowadzają dodatkowe błędy, które z nieznacznymi odchyleniami występują we wszystkich logach hydroakustycznych. Przy przechyłach rzędu kilku stopni i dużych prędkościach błąd taki może osiągnąć wartość 5% prędkości. Na dokładność pracy logu mogą mieć również wpływ:

- stabilność napięcia w sieci zasilającej;

- zakłócenia w sieci zasilającej;
- zakłócenia radiowe;
- stan morza (falowanie);
- wiry wytwarzane przez śrubę napędową okrętu;
- kawitacja, szumy, pęcherzyki powietrza.

Uwzględniając powyższe należy przyjąć dokładność wskazań logu dopplerowskiego w granicach  $\pm 0,2\%$  jako prawdziwą tylko przy dobrych warunkach eksploatacji. Jednakże, pomimo wysokiej ceny, różnorodnych zależności od zakłóceń warunków środowiskowych i trudności w wyborze miejsca zainstalowania przetwornika w kadłubie okrętu, dokładność pomiaru prędkości i przebytej drogi w przypadku logów dopplerowskich znacznie przewyższa odpowiednie parametry konkurencyjnych typów logów.

Do zalet logów hydroakustycznych należy także zaliczyć:

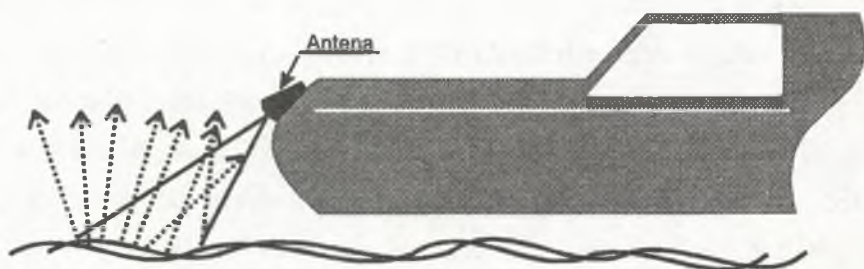
- brak elementów wystających i ruchomych pod dnem kadłuba;
- możliwość łatwego łączenia z innymi urządzeniami;
- łatwość w budowie systemów pomiarowych prędkości.

## 2.8. Radiowy log dopplerowski

W poprzednim rozdziale wspomnieliśmy, że zjawisko Dopplera dotyczy wszelkich ruchów falowych. Wykorzystywane jest to w nawigacji nie tylko w logach hydroakustycznych - w mniejszym zakresie stosowane są również logi dopplerowskie funkcjonujące w zakresie fal radiowych. Stosuje się je od lat pięćdziesiątych w lotnictwie, skąd w latach siedemdziesiątych zaadaptowano je do pomiaru prędkości jednostek bezwypornościowych (poduszkowców i wodolotów). Idea funkcjonowania tego typu logów jest identyczna jak w przypadku logów hydroakustycznych, różna jest tylko technika promieniowania fal wynikająca z innego zakresu częstotliwości. Zazwyczaj wykorzystuje się bardzo wysokie częstotliwości - zbliżone do stosowanych w radarach. Warunki stosowania tego typu mierników na jednostkach

nawodnych różnią się jednak nieco od zasad ich funkcjonowania w lotnictwie. Są także odmienne od warunków stosowania logów hydroakustycznych. Zasadnicza różnica wynika z faktu, że w przypadku wodolotu oraz bardziej poduszkowca problemem jest generowanie układu wiązek w sposób przedstawiony na rysunku 2.17. Z tego względu najczęściej dwie wiązki są emitowane z jednej, zaś dwie inne z drugiej anteny, które są montowane w górnej części jednostki, każda na innej burcie. Fale radiowe odbijają się w takich urządzeniach nie od dna morskiego lecz od powierzchni wody, co sprawia, że jest to log prędkości względnej.

Należy mieć świadomość, że gładka powierzchnia morza (sztil) uniemożliwia funkcjonowanie omawianego logu, bowiem fala radiowa odbija się wówczas według zasady zwierciadła, czyli nie wraca do odbiornika. Aby zapewnić odbicie od nierównej powierzchni morza, należy zastosować długość fal radiowych mniejszą niż wymiar elementu powierzchni, od której fala ma się odbić.



Rys. 2.19. Schemat promieniowania fal w radiowym logu dopplerowskim

Uwzględniając fakt, że nadajnik fal znajduje się stosunkowo blisko powierzchni odbijającej (najczęściej w odległości kilku metrów) wykorzystuje się zakres fal radarowych. Jest to korzystne, ponieważ produkcja podzespołów elektronicznych obsługujących ten zakres jest masowa, w związku z czym ich koszty są względnie niskie.

Jednakże wykorzystanie odbić od sfalowanej powierzchni morza jest istotnym źródłem błędów występujących w tych miernikach. Istota tego odbicia polega na rozpraszaniu promieniowanej energii we wszystkie strony, na elementarnych powierzchniach poruszających się w różnych kierunkach i pod różnym kątem do okrętu. Dlatego każdy promień w obrębie wiązki promieniowanych fal jest źródłem informacji o prędkości elementarnego fragmentu powierzchni wody. Prędkość ta składać się będzie z prędkości okrętu oraz odbijającego fragmentu wody. W efekcie szerokość widma odbieranych fal jest w takim logu nieporównanie szersza niż w przypadku omówionego powyżej logu hydroakustycznego.

W logach radiowych powszechnie stosuje się układy czterowiązkowe, gdyż tylko takie zapewniają uzyskanie odpowiednich stabilizacji wiązek, a jednocześnie umożliwiają pomiar prędkości wzdłużnej i poprzecznej, co w przypadku poduszkowców jest zadaniem niezwykle istotnym. Wskutek braku tarcia bowiem poduszkowiec jest czuły na wpływ wiatru, ma bardzo duże wartości dryfu, zwłaszcza na zwrotach.

Wskutek znacznego rozmycia widma sygnałów odbitych od powierzchni wody w każdym z czterech kanałów w ustalonym przedziale czasu przeprowadza się uśrednianie całego przedziału mierzonych częstotliwości. Okazuje się, że odbite sygnały mają charakter losowy o rozkładzie Gaussa. W związku z tym średnia wartość okazuje się najbardziej reprezentatywną dla prędkości okrętu. Omawiane logi mają bardzo szeroki zakres pomiarowy, bowiem wykazywane błędy w niewielkim stopniu zależne są od prędkości okrętu.

Istotną przyczyną błędów w radiowych logach dopplerowskich jest wpływ falowania. Jak wspomniano, teoretycznie przy zerowym stanie morza nie powinny one funkcjonować, jednak nie ma to praktycznego znaczenia, ponieważ ruch nosiciela wywołuje sfalowanie powierzchni. Natomiast nadmierne falowanie powierzchni morza powoduje zwiększone rozproszenie fal odbitych, przy czym pojawia się zjawisko przesunięcia środka widma odbieranych fal, co wprowadza błędy do odczytów. W praktyce przyjmuje się, że błędy pomiaru wykonywanego za pomocą takich mierników są rzędu 0,5% mierzonej prędkości.



## 2.9. Urządzenia inercyjne

Związek urządzeń inercyjnych z logami nie jest oczywisty. O ile bowiem zagadnienie funkcjonowania logów jednoznacznie wiąże się z ustalaniem prędkości poprzez pomiar określonej wielkości fizycznej związanej z przemieszczaniem się okrętu, to urządzenia (systemy) inercyjne przez wielu autorów traktowane są jak systemy zliczenia drogi. Oznacza to, że traktowane są jako systemy określania pozycji. Informacją wyjściową są dla nich wprowadzone współrzędne bieżącej pozycji, jednak ta grupa urządzeń zajmować powinna odrębne miejsce. Istotą ich funkcjonowania jest bowiem pomiar przyspieszeń będący podstawą do obliczania prędkości, której znajomość umożliwia obliczenie przebytej drogi. Można powiedzieć, że urządzenia inercyjne składają się z dwóch zasadniczych części:

- pomiarowej (stanowi ją blok akcelerometrów) odnoszącej się pośrednio do pomiarów prędkości;
- obliczeniowej (współcześnie w postaci komputera), który dokonuje przetworzenia informacji o prędkości na przyrosty współrzędnych, a w efekcie - na pozycję okrętu.

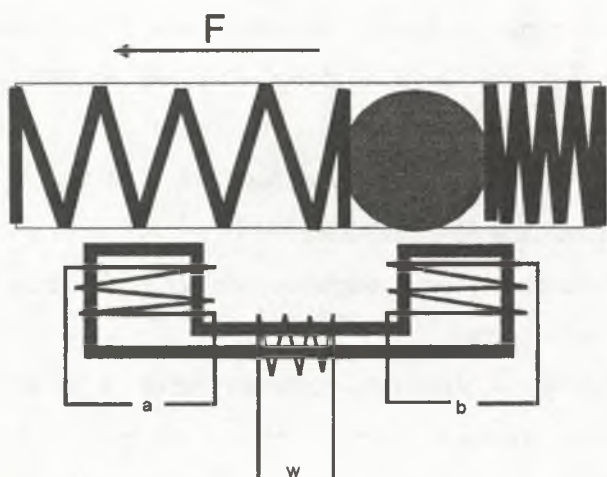
Urządzenia inercyjne mają opinię najnowszych i najnowocześniejszych, jednak należy stwierdzić, że są znane i stosowane od lat pięćdziesiątych. Niemniej do lat dziewięćdziesiątych nie zapewniały dostatecznej dokładności, były bardzo duże, ciężkie i wymagały wielkich mocy zasilania; ponadto miały niezwykle wysokie ceny. Ta ostatnia cecha była konsekwencją znacznych kosztów stosowanych w nich elementów mechaniki precyzyjnej: żyroskopów, akcelerometrów oraz układów stabilizacji. W związku z powyższym urządzenia te instalowano tylko na lotniskowcach i okrętach podwodnych z napędem nuklearnym. Warto podkreślić, iż w marynarce amerykańskiej pierwszym urządzeniem tego typu był system zainstalowany w 1960 r. na okręcie podwodnym George Washington.

W latach osiemdziesiątych pojawiły się znacznie tańsze i trwalsze układy elektroniczne zastępujące żyroskopy mechaniczne. Ponadto tanie i bardzo szybkie komputery sprawiły, iż można było zrewolucjonizować częściowo te konstrukcje eliminując układy stabilizacji (technologia *strapedown*). W efekcie urządzenia te, mimo iż nadal bardzo drogie, uzyskały na tyle atrakcyjną cenę, że bywają stosowane nawet na korwetach.

Zasadniczym elementem urządzeń inercjalnych jest akcelerometr (przyspieszeniometer). Konstrukcje tych elementów bywają różne i nie będą w niniejszym opracowaniu omawiane, jednak ich wspólną cechą jest to, że każda zawiera część posiadającą pewną masę oraz swobodę co najmniej w jednej osi układu współrzędnych. Zasada działania tej grupy urządzeń nawigacyjnych jest określona w ich nazwie – jest to zjawisko inercji, któremu poddawane są wszelkie posiadające masę przedmioty w sytuacji, gdy oddziałują na nie siły z zewnątrz. Pod wpływem tychże sił element pomiarowy przemieszcza się z określonym przyspieszeniem  $a$ . Według II zasady Newtona ciało o masie  $m$ , na które oddziałują siła  $F$ , nabiera przyspieszenia  $a$ ; kierunki wektorów  $F$  i  $a$  są zgodne.

$$\overline{a} = \frac{1}{m} \overline{F} \quad (2.7)$$

Jednoosiowy akcelerometr (urządzenie zdolne mierzyć przyspieszenia wzdłuż jednej osi) można wyobrazić sobie symbolicznie w postaci rurki z materiału amagnetycznego zawierającej swobodnie przemieszczającą się stalową kulkę, której ruch jest częściowo ograniczony z obu stron sprężynami. W stanie spoczynku kulka powinna znajdować się w położeniu środkowym, natomiast w czasie oddziaływania na akcelerometr sił zewnętrznych  $F$  wywołujących przyrost prędkości kulka będzie się przemieszczała w kierunku przeciwnym do kierunku działania siły.



Rys. 2.20. Idea działania akceleratoru

Znajdujący się w pobliżu rurki elektromagnes wytwarza słabe pole magnetyczne związane z napięciem przemiennym podanym na uzwojenie wzbudzenia w. Wskutek zjawiska transformatorowego na uzwojeniach a i b powinny pojawić się również napięcia przemienne o jednakowych wartościach. Jednak w momencie, gdy pojawi się siła  $F$  kulka przemieści się o pewien odcinek, w efekcie czego jedno z napięć po stronie wtórnej będzie silniejsze niż drugie. Ta różnica stanowi informację o przemieszczeniu kulki, a pośrednio - również o sile działającej na rurkę. Daje to podstawy do określenia przyspieszenia wywołanego siłą  $F$  na podstawie zależności (2.7).

Przypomnieć należy, że wynikiem całkowania przyspieszenia względem czasu jest prędkość, natomiast całkowania prędkości względem czasu - droga.

$$\begin{aligned} v &= \int_t a dt \\ s &= \int_t v dt \end{aligned} \quad (2.8)$$

Jednakże realizacja techniczna tej prostej zasady nie jest bynajmniej prosta. Przede wszystkim powyższa zasada jest typowym przypadkiem zliczenia

drogi. Drobne niedokładności w określeniu wartości przyspieszenia powodują błędy w obliczaniu prędkości. Całkowanie nieprecyzyjnie określonej prędkości musi natomiast powodować błędy w określaniu przebytej drogi, które będą narastały wraz z upływem czasu.

Błędy przyspieszenia wynikać mogą z następujących przyczyn:

- niedoskonałość akcelerometrów;
- rozbieżność osi pomiarowych akcelerometrów z kierunkami geograficznymi;
- błędy układu stabilizacji osi akcelerometrów w płaszczyźnie horyzontu;
- wpływ krzywizny Ziemi oraz jej ruch obrotowy.

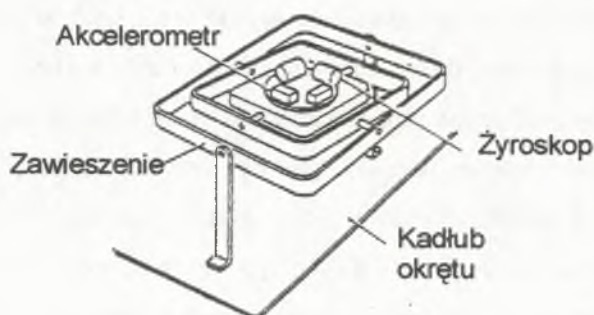
Czynnik pierwszy jest oczywisty, bowiem każdy przyrząd pomiarowy tworzy pewne niedokładności.

Zwróćmy uwagę, że akcelerometr zachowuje się w taki sposób, jak to opisano powyżej, tylko wówczas, gdy znajduje się w pozycji horyzontalnej. W przypadku, gdy akcelerometr byłby odchylony od położenia poziomego, pojawi się składowa horyzontalna siła ciężkości, która będzie sumowała się z siłą  $F$ . Idea funkcjonowania takiego systemu zakłada ponadto, że dwie wzajemnie prostopadłe osie pomiarowe (osie dwóch akcelerometrów) powinny pokrywać się z płaszczyzną południka i równoleżnika. W takiej sytuacji droga obliczona w jednej z osi może być traktowana jako zboczenie nawigacyjne, zaś druga może zostać przeliczona na przyrost szerokości geograficznej. Zarówno położenie w płaszczyźnie horyzontu oraz orientacja zgodna z kierunkami południka i równoleżnika zapewnione są dzięki zastosowaniu żyroskopów a także serwomechanizmów ustawiających platformę, na której zamontowane są akcelerometry (rys. 2.21).

Znaczenie omawianych błędów najłatwiej wytłumaczyć na przykładzie przypadku, gdy okręt płynie dokładnie kursem  $000^{\circ}$ . Należy zwrócić uwagę, iż w sytuacji, gdy orientacja osi akcelerometru zorientowanego w południku odbiegałaby od tego kierunku, wówczas będzie występowała składowa



równoleżnikowa prędkości, mimo że właśnie w tym przypadku składowa taka nie powinna występować.



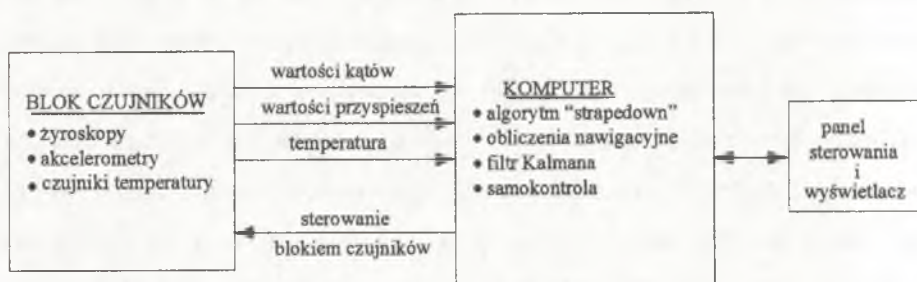
Rys. 2.21. Schemat konstrukcji klasycznego systemu inercyjnego

Platforma, na której zainstalowane są akcelerometry, jest wahliwa i istnieje możliwość odchylania jej od płaszczyzny pokładu, tak aby niwelować kołysania okrętu i utrzymywać akcelerometry w płaszczyźnie horyzontalnej. Dane dotyczące kąta odchylenia pochodzą z żyroskopów zainstalowanych również na tej platformie. Informacja z żyroskopów jest z kolei podstawą działania siłowników odchylających platformę. Jednakże żyroskopy, jako urządzenia do pomiaru kąta, tworzą błędy, a dowolne serwomechanizmy utrzymujące platformę w poziomie cechują się występowaniem procesów przejściowych. Oznacza to, że istnieje pewien przedział czasu, w którym serwomechanizm nie zdążył odpracować nieprzewidzianej, gwałtownej zmiany orientacji kadłuba okrętu. Wywołuje to występowanie niewielkich błędów w krótkich przedziałach czasu. Należy jednak pamiętać, że kołysanie okrętu, zwłaszcza w trudnych warunkach meteorologicznych, występuje ciągle. Wobec tego każdy przechyl jest przyczyną pojawiania się drobnych niedokładności w zliczeniu. Wszystkie błędy cały czas się sumują. W konsekwencji błąd pozycji zliczonej określonej za pomocą takiego urządzenia narasta w czasie; szczególnie szybko - w trudnych warunkach meteorologicznych. Było to główną przyczyną faktu, że omawiane urządzenia do niedawna stosowano tylko na wielkich

okrętach posiadających układy stabilizacji przechyłów oraz na okrętach podwodnych, które w zanurzeniu nie są narażone na gwałtowne kołysania.

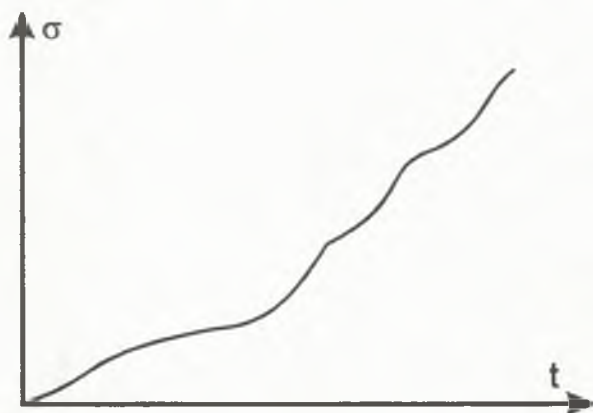
Kolejnym źródłem błędów jest przyspieszenie Koriolisa - dodatkowe przyspieszenie będące efektem wirowania Ziemi oraz przemieszczania się okrętu nie po prostej lecz po krzywiznie (wynikającej z krzywizny powierzchni Ziemi). Ta wielkość może być obliczona i uwzględniona w urządzeniu, jednak wymaga precyzyjnej znajomości pozycji okrętu - zwłaszcza szerokości geograficznej. To jednak wiąże się z problemem dokładności systemu inercjalnego, którego wskazania są wszak uzależnione od ścisłego uwzględniania omawianego przyspieszenia. W praktyce oba czynniki wzajemnie wzmacniają się wywołując większe błędy.

Ponieważ istotnym źródłem błędów w systemach inercjalnych jest dynamika układów ustawiających platformę w płaszczyźnie horyzontu, w latach osiemdziesiątych, dzięki pojawieniu się bardzo szybkich komputerów, pojawiły się odmienne konstrukcje - bezkardanowe nazywane również strappedown. W omawianych konstrukcjach platforma nie jest odchylana, lecz ulega przechyłom wraz z okrętem. Szybki komputer, na podstawie informacji z żyroskopów, oblicza na bieżąco przyspieszenia, jakie wynikają z przechyłów i odejmuje je od wskazań akcelerometrów. Eliminuje się w ten sposób jedno ze źródeł błędów wywoływane procesami przejściowymi zachodzącymi w serwomechanizmach.



Rys. 2.22. Schemat blokowy układu inercjalnego typu strappedown

Urządzenia inercyjne stanowią kompleksowy system nawigacyjny, który dostarcza informacji o prędkości rzeczywistej w dwóch osiach zgodnych z kierunkami południka i równoleżnika oraz przebytej drogi w tych osiach. W konsekwencji dostarcza również aktualne współrzędne pozycji, gdyż informacja ta wynika z sumowania na bieżąco przyrostów drogi i poprzednich współrzędnych. Mimo swych zalet, zwłaszcza pozornej niezależności od jakichkolwiek innych urządzeń nawigacyjnych, nie są one stosowane samodzielnie. Narastanie błędów współrzędnych pozycji w funkcji czasu powoduje, że wraz z upływem czasu rośnie również wartość błędów prędkości, co z kolei powoduje zwiększenie prędkości narastania błędów pozycji. Typowy wykres błędu dowolnej współrzędnej określonej przez omawiane urządzenie przedstawiono na rys. 2.23. Zobrazowano na nim systematyczne narastanie błędów przy udziale pewnej składowej oscylacyjnej. Proces ten wymaga uwzględniania w takim systemie dodatkowej informacji niezależnej od akcelerometrów. Mogą to być dane z systemu radionawigacyjnego, jednak często stosuje się również informacje z logu prędkości względnej, która w kombinacji z prędkością obliczoną w urządzeniu inercyjnym pozwala zwiększyć dokładność obliczeń.



Rys. 2.23. Typowy wykres błędów współrzędnej określonej systemem inercyjnym w funkcji czasu

W przypadku systemów inercjalnych nie rozważa się dokładności określenia prędkości. Zasadniczymi informacjami o dokładności takich urządzeń są błędy pozycji zliczonej oraz określenia kierunków w trzech osiach układu kartezjańskiego. Przykładowo, dokładność pozycji dla tego typu systemów określona jest na około 0,6 Mm po godzinie. Nie trudno obliczyć, że oznacza to błąd prędkości rzędu 0,1 kbl/min czyli około 0,6 w.



## Rozdział 3

### ZASADY REGULACJI LOGÓW

Niniejszy skrypt jest kierowany przede wszystkim do użytkowników logów, a więc osób, dla których priorytet stanowi zrozumienie zasad funkcjonowania urządzenia oraz sposobów określania jego błędów.

Należy założyć, że regulacje logów należą do zadań specjalistów wykonujących tego rodzaju usługi na rzecz załogi okrętu. Mimo to istotne jest, by nawigator był świadom zasad, których należy przestrzegać w trakcie wykonywania tego zadania. Jednakże zasady regulacji każdego typu logu są nieco odmienne i zależą od jego konstrukcji. Dlatego niemożliwe jest przedstawienie jednolitej procedury kalibracji całej gamy stosowanych logów.

Poniżej zostaną przedstawione uniwersalne zasady dotyczące wszelkich konstrukcji logów, bez precyzowania szczegółów specyficznych dla poszczególnych konstrukcji.

Regulacja logu jest działaniem mającym na celu zniwelowanie lub co najmniej zmniejszenie uchybu tego przyrządu pomiarowego, czyli mówiąc językiem stosowanym powszechnie przez nawigatorów - błędów logu. Dlatego też czynność ta musi być poprzedzona określeniem błędów logu. Jak wspomniano wcześniej, błędy logów cechują się znaczną nieliniowością, w dużym stopniu zależą od konkretnego egzemplarza logu oraz od własności kadłuba okrętu, a ponadto są funkcją prędkości. Ustalenie ich rzeczywistego przebiegu wymagałoby więc szczegółowych pomiarów błędów logu dla wielu prędkości. Jest to kosztowne, a w praktyce celowość tego może być kwestionowana, jeśli okręty zwykle pływają z kilkoma typowymi prędkościami. Z tego względu przyjęła się powszechnie praktyka aproksymowania krzywej błędów logu prostą o stałym nachyleniu według zależności:

$$k = a + bV, \quad (3.1)$$

gdzie:

$a$  - składowa stała niezależna od prędkości okrętu, odpowiadająca wartości współczynnika  $k$  przy prędkości  $V = 0$ ;

$b$  - tangens kąta nachylenia prostej  $k$  względem osi  $V$ .

Zależność współczynnika  $k$  od prędkości  $V$  przedstawiono na rysunku 3.1. Funkcja ta nie tylko jest różna dla poszczególnych kadłubów i nieco odmienna w przypadku indywidualnych egzemplarzy logów i okrętów, lecz ulega ponadto zmianom wraz z upływem czasu. Regulacja logu polega na wprowadzeniu w układy logu takich wartości regulacyjnych, by po dodaniu ich do wyniku pomiaru uzyskać zniwelowanie występującego w danym momencie jego uchybu (błędu).

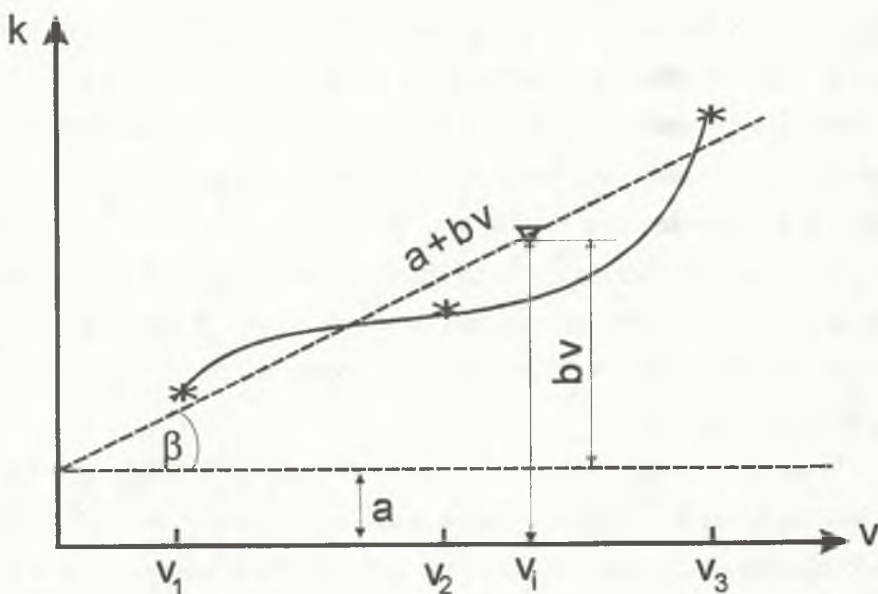
Powszechnie przyjęta praktyka pomiaru w trzech punktach, dla trzech charakterystycznych prędkości okrętu: minimalnej, podróżnej oraz maksymalnej ( $v_1, v_2, v_3$ ), jest podejściem bardzo zbliżonym do zasad określania poprawki logu.

Można uogólnić, iż logi hydrodynamiczne oraz indukcyjne są wyposażone w układy regulacyjne funkcjonujące według zależności (3.1). Oznacza to, że umożliwiają one dokonanie doboru uchybu (błędów) logu poprzez dopasowanie współczynnika  $k$  do rzeczywistych warunków pracy logu na okręcie. W przypadku układu kompensacyjnego o konstrukcji elektromechanicznej, którą opisano w rozdziale 2.3, elementy regulacyjne powodują zmianę naciągu sprężyn w układzie przeciwdziałającym odchyleniu membrany. Składowa stała  $a$  współczynnika  $k$  jest kompensowana za pomocą regulatora A - wstępnego naciągu sprężyny znajdującej się na trzpieniu powyżej styków (7). Składowa zmienna  $bV$  - proporcjonalna do prędkości okrętu - kompensowana jest za pomocą regulatora B naciągu sprężyny (13) zmieniającej naciąg pod wpływem krzywki obracanej proporcjonalnie do mierzonej prędkości. Zazwyczaj w tego typu logach występuje również trzeci rodzaj regulatora - C - w postaci śruby

umocowanej na osi trzpienia (5), którym reguluje się zerowe położenie membrany.

W przypadku logów zbudowanych na bazie elementów elektronicznych podobne funkcje realizuje się na układach elektronicznych. Wartość współczynnika  $a$  z równania (3.1) stanowi oporność potencjometru regulowanego w trakcie kalibracji logu. Zmienny współczynnik  $b$  realizowany bywa na dwa sposoby:

- przez zmienne oporności osiągane na układzie potencjometrycznym, w którym jeden z potencjometrów jest obracany przez wskaźnik prędkości, a więc wraz ze zmianą prędkości zmienia się położenie suwaka potencjometru;
- przez układ wzmacniaczy w obwodzie sprzężenia zwrotnego, w których jeden ze stopni sterowany jest napięciem wyjściowym logu.



Rys. 3.1. Krzywa regulacji logu

Opisanych powyżej czynności nawigator nie powinien wykonywać samodzielnie, bowiem wymaga to pewnego doświadczenia. Wskazane jest, by powierzać je specjalistom, a ponadto nie dokonywać ich zbyt pochopnie. Jeżeli

zostaną stwierdzone niedokładności we wskazaniach logu, zaleca się raczej uwzględnianie odpowiedniej poprawki wskazań.

Na podstawie analizy rys. 3.1 można wnioskować, że regulacja układu za pomocą dwóch regulatorów stanowi duże uproszczenie. Pomija się bowiem nieliniowości występujące w układzie. Widać to na przykład w punkcie  $V_i$ , w którym wartość na krzywej (wartość rzeczywista) różni się wyraźnie od wartości na prostej  $a+bV$ . Różnice te są przyczyną błędów szcątkowych, z którymi mamy do czynienia w praktyce nawigacyjnej - po wykonaniu regulacji logu. Niwelujemy je uwzględniając poprawki logu zestawione w tabeli.

Nasuwa się wniosek, że wskazane byłoby uwzględnienie poprawek wyższego rzędu. W wielu typach logów stosuje się takie rozwiązania, na przykład poprzez wprowadzanie odpowiednio ukształtowanych krzywek. Jednak nie przyjęło się to powszechnie, bowiem wymaga dodatkowego określania poprawek po wprowadzeniu poprawek A i B. Zazwyczaj uznaje się, że skutki błędów szcątkowych są mniejsze niż koszty przeprowadzenia takich dodatkowych pomiarów. Ponadto, zwróćmy uwagę, iż międzynarodowe normy dopuszczają uchyby (błędy) logu do 5%. Ponieważ pomiary poprawek logu po regulacji przeprowadza się zwykle przy charakterystycznych dla konkretnego okrętu prędkościach (przy których regulowano uprzednio log) trudno oczekiwać, aby te szcątkowe błędy przekraczały wartości podane w normach. Z tego powodu zwykle jest brak podstaw do przeprowadzania tego rodzaju dodatkowych regulacji.

Powyższe rozważania dotyczą tylko kanału prędkości wzdłużnej w logach hydrodynamicznych oraz indukcyjnych. Nawet w przypadku wieloskładnikowych logów indukcyjnych regulacje przeprowadzane są w kanale pomiaru prędkości wzdłużnej, natomiast w kanale prędkości poprzecznej nie stosuje się regulatorów. Wynika to z faktu, że prędkości poprzeczne nie przekraczają zwykle 3 w., a ponadto nie opracowano metodyki pomiaru poprawek tych prędkości. Wymagałoby to bowiem wywołania przemieszczania się okrętu pod kątem (dryfu), co obecnie jest niewykonalne. Dryf okrętu



wprawdzie w praktyce występuje bardzo często, jednak trudno uzyskać zamierzoną jego wartość.

Powyższe rozważania dotyczą tylko dwóch rodzajów logów prędkości względnej. Regulacje logów korelacyjnych oraz dopplerowskich przeprowadza się według innych zasad, bowiem ich funkcjonowanie bazuje na układach cyfrowych, a to pozwala zastosować bardziej wyrafinowane metody analityczne. W przypadku logów hydrodynamicznych lub indukcyjnych tylko z dużym przybliżeniem można przy różnych prędkościach obliczyć wartości mierzonych parametrów, bowiem zależą one od wielu zmiennych: własności wody, miejsca usytuowania czujnika oraz parametrów logu. W przypadku logu hydroakustycznego wartość mierzona jest dokładnie znana – jest nią dopplerowskie przesunięcie częstotliwości. Można więc podczas postoju podać częstotliwość wzorcową z niezależnego układu testującego na odbiorczy i nie wychodząc z portu wyregulować układy elektroniczne logu do konkretnych prędkości - zależnie od parametrów ustalonych przez producenta. Oczywiście, należy jasno uświadamiać sobie, że jest to tylko regulowanie części układów logu i nie oznacza całkowitego wyeliminowania błędów.

Identyczne sposoby są stosowane w przypadku logu korelacyjnego. Wówczas, w wariacie testowania logu, sygnał sondujący podaje się poprzez element opóźniający na przetwornik odbiorczy. Uwzględniając wartość wprowadzonego sztucznie opóźnienia i znając odległość pomiędzy przetwornikami nietrudno obliczyć, jaką prędkość powinien wskazywać log. Zwykle sztuczna linia opóźniająca jest wbudowywana (przez producenta) w urządzenie jako tester logu. Do przeprowadzenia testowania konieczne jest tylko odpowiednie przestawienie elementów sterujących. Ponadto, nastawy linii opóźniającej są cechowane wartościami prędkości, które log powinien wskazywać. Dlatego po przełączeniu logu na funkcję testowania konieczne jest wyregulowanie go tak, aby wskazywał taką prędkość, jaką dla danego położenia nastaw testera przewidział producent.

Podobne rozwiązania pojawiają się obecnie również w przypadku logów indukcyjnych, bowiem niektórzy producenci również wyposażają je w podobnie

funkcjonujące testery, które podają na obwody wejściowe toru pomiarowego takie napięcia, jakie powinny pojawić się na wyjściu przetwornika przy konkretnych prędkościach. W związku z tym regulacja logu może polegać jedynie na wprowadzeniu w porcie odpowiednich nastaw, tak aby przy odpowiednich przełączeniach testera log wskazywał zadane prędkości.

Powyższe przykłady dotyczą tylko regulacji układów logu, bez względu na zasady jego funkcjonowania. Nie obejmują one błędów, jakie mogą pojawić się na elementach stykających się z wodą, a co najważniejsze – nie uwzględniają zakłóceń, jakie wprowadza kadłub okrętu w strumień przepływającej wokół niego wody. Przypomnieć należy, że poza logiem hydroakustycznym i urządzeniami inercyjnymi wszystkie pozostałe funkcjonują na podstawie założenia, że prędkość przepływu strumienia wody w miejscu pomiaru dokonywanego za pomocą czujnika logu jest identyczna z prędkością okrętu. Założenie to nie jest prawdziwe dla dowolnego miejsca w otoczeniu okrętu. Kadłub okrętu powoduje bowiem dwojakiego rodzaju zakłócenia w laminarnym przepływie wody:

- w tzw. warstwie przyściennej o grubości rzędu kilku centymetrów (równiej odległości od kadłuba) wskutek lepkości wody następuje zjawisko przyklejania i w efekcie pociągania warstwy wody przez kadłub; w tej cienkiej warstwie nie należy więc umieszczać przetwornika;
- w większych odległościach od kadłuba następują bardzo zmienne zakłócenia przepływu wody wywołane ingerencją skomplikowanego kształtu kadłuba okrętu w liniowość przepływu wody; przed kadłubem oraz w odległości do  $1/3$  długości okrętu od dziobu następuje wzrost ciśnienia wskutek pchania masy wody przez kadłub; rozpychana przez kadłub woda nie płynie tylko wzdłuż niego, lecz częściowo pod nim, a częściowo od niego; pomiar prędkości w tej strefie, bez względu na to, jaki parametr byłby mierzony, nie może dać wiarygodnych wyników; ponadto, zwłaszcza w warunkach wzmożonego falowania, w tej części występuje duże nasycenie wody pęcherzykami powietrza,

co powodowałoby zapowietrzanie się układu pomiarowego w logu hydrodynamicznym i utrudniałoby propagację dźwięku w przypadku logu hydroakustycznego; odcinek od śródkręcia do rufy okrętu nie jest odpowiedni do instalacji logu - ze względu na hałasy wytwarzane przez układ napędowy, a więc utrudnienia w pracy logu hydroakustycznego i korelacyjnego; w tym obszarze rozpoczyna się kolejna strefa nieliniowego przepływu wody porywanej przez układ napędowy; można to wyobrazić sobie w ten sposób, że cząstki wody płyną nie tylko wzdłuż kadłuba, bowiem śruba porywa również część wody z boku i spod okrętu; w efekcie strumień przepływającej wody nie jest równoległy do kadłuba, ponieważ jest zaburzony, a także spada (w tym obszarze) ciśnienie.

Kolejnym źródłem potencjalnych błędów w pomiarze prędkości okrętu za pomocą logu mogą być inne urządzenia pomiarowe - logi lub urządzenia hydroakustyczne. Szczególnym problemem dotyczącym tego zagadnienia, który może pojawić się na etapie budowy okrętu na skutek braku porozumienia specjalistów z różnych dziedzin, jest ewentualność instalowania czujnika logu w pobliżu otworów przeznaczonych do zasysania lub wypompowywania wody morskiej. Jest oczywiste, że również w takich przypadkach pojawiają się zaburzenia przepływu wody, a więc także błędy logu nie wynikające z regulacji jego układów.

Powyższe uwagi nie dotyczą codziennej działalności nawigatora na okręcie, jednak na jednostkach nowych lub przebudowywanych zdarzają się, dlatego warto brać je pod uwagę.

W codziennej działalności oficera wachtowego mogą nastąpić przypadki wskazywania przez log nieprawdopodobnych wartości w trakcie pływania na płytkich wodach, w kanałach portowych lub na rzekach. Pojawiają się one wówczas, gdy czujnik logu, najczęściej usytuowany przed śródkręciem, znajduje się w miejscu, w którym tworzy się typowa dysza pomiędzy dnem morskim a dnem kadłuba okrętu. W wąskim i płytkim kanale woda nabiegająca od dziobu okrętu całym przekrojem kanału musi zmieścić się w wąskim świetle

prześwitu pod okrętem. W takiej dyszy prędkość wody wzrasta. Jeżeli bowiem w stałym przedziale czasu ma następować przepływ tej samej objętości wody, wówczas w mniejszym świetle pomiędzy kadłubem i dnem kanału musi to nastąpić z większą prędkością. Daje się to również wytłumaczyć faktem, że napierający na wodę w swym ruchu do przodu okręt wywołuje wzrost ciśnienia wody przed sobą. Na pełnym morzu brak jest ograniczeń dla ruchu wody, więc strefa wzrostu ciśnienia rozpościera się dość szeroko wokół okrętu. W kanale na przeszkodzie stają jego granice, więc strefa zwiększonego ciśnienia przed okrętem powoduje nacisk na tę objętość wody, która znajduje się pod kadłubem, wywołując jej szybsze przemieszczanie. Dlatego też na płytkich i wąskich kanałach ograniczonych brzegami woda pod okrętem przepływa szybciej niż okręt względem kanału, co oznacza, iż log wskazuje wówczas prędkości znacznie (niekiedy nawet wielokrotnie) zawyżone i nie można jego wskazań uznawać za pewne.



## Rozdział 4

### POMIARY PRĘDKOŚCI OKRĘTU

Jeszcze w końcu lat sześćdziesiątych pomiar prędkości stanowił niezwykle istotne zagadnienie w praktyce nawigacyjnej, bowiem w związku z brakiem precyzyjnych i dostępnych w każdym momencie metod pomiaru wielkości, które pozwalałyby określić pozycję obserwowaną, nawigator zmuszony był prowadzić precyzyjne zliczenie drogi. Wymagało to jednak dokładnego określania prędkości, co - ze względu na brak odpowiednich przyrządów pomiarowych - nie było łatwe. Należy bowiem pamiętać, że jeszcze po drugiej wojnie światowej często jedynym urządzeniem stosowanym do pomiaru prędkości był log burtowy lub ręczny.

Wprawdzie w czasach drugiej wojny światowej istniało kilka typów urządzeń do pomiaru prędkości okrętu, jednak nie wszystkie jednostki pływające (zwłaszcza statki) były w nie wyposażone. Obecnie sytuacja zmieniła się diametralnie, bowiem funkcjonuje znaczna ilość różnych odmian logów. Nierzadko na okręcie zainstalowanych jest kilka logów jednocześnie.

W codziennej działalności nawigatora na współczesnym okręcie pomiary prędkości okrętu nie absorbują go nadmiernie, bowiem polegają na odczytaniu wskazań logu i uwzględnieniu poprawki jego wskazań. W niniejszym rozdziale rozważona zostanie sytuacja szczególna - gdy zachodzi potrzeba zweryfikowania wskazań logu (określenia jego błędów) czy ustalenia rzeczywistych prędkości okrętu nowego lub po remoncie. Istota takich pomiarów, w zakresie weryfikacji funkcjonowania logu i określania rzeczywistej prędkości okrętu, polega na określeniu przebytej drogi oraz pomiarze czasu pomiędzy momentem początkowym i końcowym pomiaru drogi. Z tego względu pomiary te zazwyczaj przeprowadza się równocześnie.

Ponieważ dokładność pomiaru czasu jest obecnie dostatecznie wysoka, błędy pomiarów prędkości i kryteria ich podziału wynikają ze sposobu określenia przebytego przez okręt odcinka drogi. Do tego celu można użyć dowolnych metod wyznaczania pozycji początkowej i końcowej określających przebytą w trakcie pomiarów drogę. Należy jednak brać pod uwagę fakt, że błędy w określaniu obu pozycji decydują o dokładności pomiaru (w powyższy sposób) drogi. W związku z tym oczywiste jest, że w celu uzyskania odpowiedniej dokładności pomiaru prędkości należy dążyć do minimalizowania błędów pozycji.

Wpływ dokładności obu pozycji na pomiary prędkości można również zmniejszyć poprzez wydłużenie odcinka pomiarowego, bowiem dla jakości pomiarów nie jest istotna wartość błędu długości przebytego odcinka, lecz proporcja błędu określenia przebytej drogi i długości tego odcinka. Jest bowiem oczywiste, że błąd określenia początku oraz końca odcinka pomiarowego równy 1 kablowi ma zupełnie inne znaczenie w przypadku długości odcinka pomiarowego równej 1 Mm niż długości 10 Mm.

Pozornie prostym rozwiązaniem zwiększającym dokładność tego typu pomiarów jest wydłużenie odcinka pomiarowego, jednak może być ono stosowane tylko w wyjątkowych przypadkach - wymagałoby bowiem działania na rozległych akwenach. Ponadto nie można zapominać o tym, iż okręty są „paliwożerne” i każda dodatkowa mila przebytej drogi podnosi koszty pomiarów. Wobec tego, wydłużenia długości odcinka pomiarowego można dokonać wówczas, gdy przy okazji przejścia morzem przy sprzyjających warunkach meteorologicznych, nawigator pragnie upewnić się, że log funkcjonuje prawidłowo. Jednak w przypadku pomiarów wykonywanych w trakcie prób stoczniowych należy dążyć do wykonania ich jak najbliżej stoczni na minimalnej dopuszczalnej drodze.

Z powyższego można wyciągnąć wniosek, że do pomiarów prędkości można wykorzystać dowolny system określania pozycji, w szczególności systemy radionawigacyjne, satelitarne, radar oraz wszelkie sposoby wizualne. Jednak najpowszechniej stosowaną metodą jest określanie prędkości

na specjalnym poligonie, na którym odcinek pomiarowy wyznaczany jest przez nabieżniki. Powoduje to bardzo wysoką dokładność pomiaru przebytej drogi.

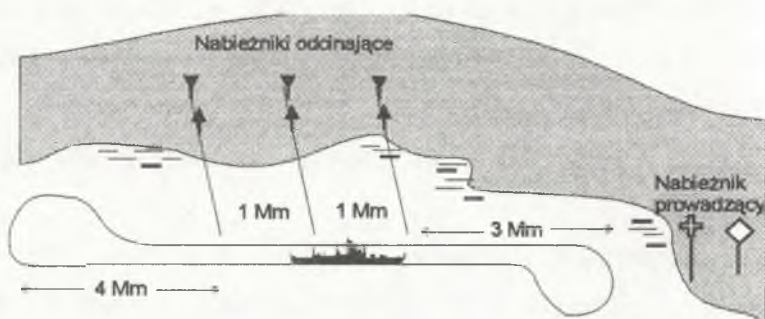
#### 4.1. Określanie prędkości logu na mili pomiarowej

Poligony manewrowe, na których przeprowadza się pomiary rzeczywistych prędkości okrętu przy wybranych nastawach silników oraz określanie błędów logu nazywane są w żargonie marynarskim milami pomiarowymi (niekiedy liniami pomiarowymi). Nazwa ta bynajmniej nie oznacza, iż odcinek pomiarowy równy jest długości jednej mili, wręcz przeciwnie - zwykle odcinki te są kilkakrotnie dłuższe. Poligon taki, jak każdy akwen, na którym zamierzamy przeprowadzać pomiary prędkości, musi spełniać określone wymagania, w szczególności zaprezentowane poniżej.

1. Głębokości powinny być wystarczająco duże, aby wykluczyć hamujący wpływ płytkowodzia na wyniki pomiarów.
2. Ze względów bezpieczeństwa powinien znajdować się w odpowiedniej odległości od przeszkód nawigacyjnych (przyjmuje się, że nie mniej niż 1,5 - 2 mile morskie).
3. Na obu końcach odcinka pomiarowego powinna być zapewniona przestrzeń do wykonywania bezpiecznych manewrów, w szczególności zwrotu oraz rozwinięcia pełnej prędkości odpowiadającej danym warunkom pomiaru. Zazwyczaj przyjmuje się, że w przypadku statków powinny to być co najmniej 3 mile morskie. Okręty, szczególnie małe, nie wymagają tak dużych rozbiegów.
4. Długość odcinka pomiarowego zależna jest od prędkości, jaką ma rozwijać okręt, najczęściej wynosi 2-5 Mm. Uwzględniając akwen na obu końcach odcinka pomiarowego ogólna długość mili pomiarowej wynosi nierzadko 10 Mm.

5. Akwen mili pomiarowej powinien być w możliwie dużym stopniu osłonięty przed falowaniem i wiatrami.
6. W akwencie poligonu nie powinien występować stały prąd. Jeżeli jest, wówczas jego prędkość powinna być mała i stała w czasie trwania pomiarów. Kierunek przepływu prądu w miarę możliwości powinien być zgodny z kierunkiem mili pomiarowej.
7. Dla zwiększenia dokładności pomiarów korzystne jest, gdy kierunek mili pomiarowej jest wyznaczony przez oznakowanie stałe lub chociaż pływające, bowiem unika się wówczas wydłużenia pokonywanego odcinka wskutek myszkowania okrętu, co następuje zawsze, gdy steruje się według wskazań kompasu (szczególnie żyroskopowego). Należy bowiem pamiętać, iż każdy kompas jest układem dynamicznym charakteryzującym się własnymi oscylacjami, których sternik nie jest w stanie oddzielić od rzeczywistych zmian kursu okrętu. W efekcie, sterując według kompasu zawsze powodujemy poruszanie się okrętu po linii falistej, co jest przyczyną wydłużania przebytego odcinka.
8. W celu ustalenia długości mili pomiarowej lub jej odcinków pomiarowych wystawione powinny być nabieżniki odcinające albo inny, precyzyjny system pozycyjny.

Przykładowy rejon poligonu manewrowego przedstawia rysunek 4.1.



Rys 4.1. Rejon poligonu do określania prędkości okrętu i poprawki logu (mila pomiarowa)



Analizując powyższy rysunek należy zwrócić uwagę na sposób manewrowania okrętu, zwłaszcza na fakt, iż okręt powinien przed wejściem na odcinek pomiarowy manewrować na kursie zgodnym z kierunkiem tegoż odcinka osiągając wcześniej zadaną prędkość. W przeciwnym bowiem przypadku prędkość na odcinku pomiarowym nie będzie ustabilizowana, co oznacza, iż wyniki pomiarów będą fałszywe. Natomiast po przejściu kończącego pomiar nabieżnika odcinającego powinien odchylić się od zadanego kursu wykonując zwrot przygotowujący do kolejnego przebiegu. Kierunek tego zwrotu zależy jest od warunków miejscowych, jednak zawsze musi to być zwrot w kierunku od niebezpieczeństwa - co oznacza zwykle *od lądu*, chociaż w szczególnych przypadkach może zachodzić konieczność uwzględniania innych przeszkód, zwłaszcza małych głębokości. Na przykład, znajdująca się na Półwyspie Helskim mila pomiarowa, której układ jest bardzo zbliżony do przedstawionego na rysunku 4.1, charakteryzuje się znacznym zmniejszeniem głębokości pomiędzy odcinkiem pomiarowym i brzegiem; bywało to niejednokrotnie przyczyną wejścia okrętu na mieliznę w trakcie pomiarów.

W celu określenia prędkości osiąganej przez okręt przy danych nastawach układu napędowego na mili pomiarowej wystarczy zmierzyć czas przejścia wyznaczonego odcinka pomiarowego, którego długość wyznaczają nabieżniki odcinające. Ponieważ jednak zazwyczaj w takich wypadkach określa się również błędy logu, można powiedzieć, iż istnieją dwie metody określania pomiarów na mili pomiarowej. Oznaczają one dwa sposoby określania przebytej drogi na podstawie logu:

- według porównania przebytych odległości;
- według porównania określonych prędkości.

Pierwszy sposób polega na tym, że na początku i końcu przebiegu notuje się odczyty logu OL. Różnica tych odczytów stanowi informację o przebytej drodze zmierzonej za pomocą logu, a znając długość przebiegu  $S$  według mili pomiarowej i czas trwania przebiegu  $t$  można obliczyć rzeczywistą prędkość okrętu  $V_k$ :

$$V_k = 3600 S/t, \quad (4.1)$$

gdzie:

$t$  - rzeczywisty czas przejścia między nabieżnikami linii pomiarowej w sekundach;

$S$  - droga pomiędzy nabieżnikami odcinającymi;

$V_k$  - prędkość rzeczywista okrętu.

Można obliczyć prędkość wskazywaną przez log:

$$V_L = 3600 ROL/t, \quad (4.2)$$

gdzie:

$$ROL = OL_2 - OL_1;$$

$V_L$  - prędkość według wskazań logu.

Drugi sposób różni się od pierwszego tym, że odczyt logu  $OL_1$  notuje się nie w momencie początku przebiegu (w nabieżniku odcinającym), lecz wtedy gdy po przekroczeniu nabieżnika log wskaże pełną liczbę dziesiątych części mili. Wówczas należy rozpocząć pomiar czasu  $t_L$  za pomocą sekundomierza. Po zakończeniu przebiegu, kiedy różnica odczytów logu będzie równa pełnej liczbie dziesiątych części mili (najkorzystniej jest, gdy równa się ona długości odcinka  $S$ ), należy zatrzymać sekundomierz. Następnie oblicza się prędkość rzeczywistą  $V_k$  na podstawie długości przebytej między nabieżnikami drogi  $S$  oraz zmierzonego czasu  $t$ ; ponadto prędkość określoną według logu oblicza się ze wzoru:

$$V_L = 3600 ROL/t_L. \quad (4.3)$$

Wartość poprawki logu dla danej prędkości okrętu, bez względu na sposób pomiaru, określa wzór:

$$\Delta \log = \frac{V_k - V_L}{V_L} \cdot 100, \quad (4.4)$$

gdzie

$V_k$  - prędkość rzeczywista okrętu na mili pomiarowej.

Tę samą wartość można uzyskać z zależności:

$$\Delta \log = \frac{S - ROL}{ROL} 100. \quad (4.5)$$

Warto zwrócić uwagę, że poprawka powyższa określa, ile procent drogi (przebytej według wskazań logu) należy dodać do różnicy odczytów logu, aby uzyskać rzeczywistą informację o drodze przebytej przez okręt. Jednak poprawka ta nie jest stała i zwykle zależy od prędkości okrętu. Dlatego pojawia się potrzeba określania jej przy różnych prędkościach (nastawach układu napędowego). W związku z tym dużą popularność zdobyła metoda obliczania według zależności (4.4), bowiem jednocześnie uzyskujemy informację, dla jakiej prędkości ta poprawka została określona.

Określenia poprawki logu dokonuje się na głównych prędkościach okrętu. Zazwyczaj są to mała naprzód, pół naprzód i cała naprzód dla typowych stanów zanurzenia jednostki. W przypadku okrętu zmiany zanurzenia nie są zbyt istotne, bowiem najważniejsze jest określenie jego własności w warunkach, gdy na pokładzie znajdują się pełne zapasy. Statek handlowy musi mieć określone poprawki dla dwóch stanów – gdy jest pełny i pod balastem. Poprawki logu okrętu podwodnego powinno się określać również w zanurzeniu. Ten ostatni przypadek jest szczególnie kłopotliwy, gdyż wymaga specjalnego poligonu pomiarowego.

W drugiej metodzie do pomiaru czasu niezbędne są dwa sekundomierze. Za pomocą jednego określa się czas  $t$  przebiegu między nabieżnikami na początku i końcu mili pomiarowej, zaś drugim mierzy się czas  $t_L$  pomiędzy momentem pierwszego przeskoku licznika drogi na pełne dziesiąte części mili

morskiej (po wejściu na linię pomiarową), aż do zliczenia przez log drogi równej długości linii pomiarowej, co łączy się z przeskokiem licznika na pełne dziesiąte części mili morskiej (po zakończeniu przebiegu). Często w celu zwiększenia dokładności zaleca się wyznaczać do pomiarów trzech obserwatorów, a zmierzone przez nich wartości uśredniać.

Na każdej prędkości dokonuje się dwóch przejazdów (na kontrkursach), a następnie uśrednia pomiary, przede wszystkim w celu wyeliminowania błędów grubych a także (w miarę możliwości) zwiększenia dokładności pomiarów.

Prędkość rzeczywistą jednego przebiegu określa się wzorem (4.1), a prędkość według logu wzorem (4.2). Średnią prędkość dwóch przebiegów oblicza się jako średnią arytmetyczną:

$$V_k = (V_1 + V_2) / 2, \quad (4.6)$$

lub

$$V_L = (V_{L_1} + V_{L_2}) / 2. \quad (4.7)$$

Poprawkę logu dla każdego przebiegu oblicza się zgodnie z wzorem (4.4) lub (4.5) Średnia poprawka z dwóch przebiegów wynosi:

$$V_k = (V_1 + V_2) / 2$$

$$\Delta \log = (\Delta \log_1 + \Delta \log_2) / 2, \quad (4.8)$$

gdzie:

$\Delta \log_1, \Delta \log_2$  - poprawki logu obliczone odpowiednio dla 1. i 2. przebiegu.

Aby wykluczyć wpływ prądu na określenie poprawki logu, należy dokonać trzech przejazdów mili pomiarowej. W tym przypadku poprawkę logu oblicza się według wzoru:



$$\Delta \log = \frac{\Delta \log_1 + 2\Delta \log_2 + \Delta \log_3}{4} \quad (4.9)$$

Zamiennie z poprawką logu stosuje się współczynnik korekcyjny logu:

$$K = \frac{S}{ROL} \quad (4.10)$$

Z zależności powyższej nietrudno wyprowadzić wzór:

$$S = K \cdot ROL \quad (4.11)$$

Współczynnik korekcyjny logu jest zatem w istocie wartością (mnożnikiem), przez którą należy pomnożyć różnicę odczytów logu, aby poznać rzeczywistą wartość przebytej przez okręt drogi.

Po określeniu błędów logu należy dokonać właściwych adnotacji w dzienniku nawigacyjnym sporządzając odpowiednią tabelkę poprawek logu i wykres określonych (przez log) w trakcie pomiarów prędkości. Należy bowiem pamiętać, że podczas żeglugi nawigatorowi dostępna jest tylko informacja o prędkości (określona przez log), którą właśnie trzeba poprawić.

Obecnie, w dobie powszechnego stosowania logów na okrętach, zaleca się również notowanie informacji o nastawach śrub napędowych i obrotach silników oraz osiąganych prędkościach, aby w przypadku awarii logu oficer wachtowy posiadał co najmniej orientacyjną wiedzę o prędkości okrętu uzyskaną na podstawie obserwacji nastaw układu napędowego. Należy przy tym zdawać sobie sprawę z tego, iż związek tychże nastaw z prędkością okrętu nie jest stały i zależy w dużym stopniu od warunków środowiska. Szczególnie ścisła zależność istnieje pomiędzy osiąganą prędkością okrętu, falowaniem oraz wiatrem. Oczywiście jest, że wiatr z rufy powoduje wzrost prędkości, zaś przeciwny - jej spadek. Jednak falowanie, bez względu na kierunek, zwykle zmniejsza prędkość

okrętu. Nawet fala z rufy zazwyczaj nieco zmniejsza prędkość, a z kierunków dziobowych – obniża ją nawet o 30%.

Na prędkość okrętu ujemnie wpływa również obrastanie kadłuba przez mikroorganizmy morskie, co następuje nieuchronnie w miarę upływu czasu od chwili pomalowania podwodnej części okrętu. Doświadczenie wskazuje, iż okręt, który schodzi z doku ze świeżo pomalowaną częścią podwodną, osiąga prędkość większą nawet o kilka węzłów od tych, z którymi pływał przed dokowaniem.

Kolejnymi czynnikami wpływającymi ujemnie na osiąganą prędkość są: wzrost zanurzenia oraz przechyły i przegłębienia. Straty prędkości spowodowane każdą z tych przyczyn mogą dochodzić do 10%. W przypadku statków handlowych, a także części okrętów, istotny jest hamujący wpływ dna morskiego na płytkich wodach. Przyjmuje się, iż problem ten występuje, gdy stosunek głębokości morza  $H$  do zanurzenia jednostki  $T$  jest mniejszy niż 6:

$$H/T \leq 6, \quad (4.12)$$

gdzie:

$H$  – głębokość akwenu;

$T$  – zanurzenie okrętu.

Na przykład, nawet w przypadku małego okrętu o zanurzeniu 3 m wpływ ten będzie istniał do głębokości morza ok. 18 m. Jednak po uwzględnieniu prędkości okrętu zależność na głębokość graniczną, gdy hamowanie dna morskiego przestaje występować, przybiera postać:

$$H = 3 \frac{V^2}{g} + 4T, \quad (4.13)$$

gdzie

$g$  - przyspieszenie ziemskie.

Podczas przygotowań do pomiarów prędkości lub błędów logu należy zorganizować grupy zapisu i obserwacji, zaopatrzyć je w odpowiednie tabele i sprzęt. Szczególną uwagę zwrócić trzeba na dokładność poprawek sekundomierzy. Ponadto oficer odpowiedzialny za wykonywanie pomiarów powinien dokładnie zapoznać się z warunkami panującymi w rejonie, w którym będą prowadzone pomiary.

Względy ekonomiczne nakazują, aby określanie prędkości osiąganych przez okręt, błędów lub poprawek logu oraz regulacje logu odbyły się podczas jednego wyjścia okrętu w morze. W celu zapewnienia odpowiednich dokładności wyników w czasie wykonywania pomiarów muszą zostać spełnione następujące warunki:

- siła wiatru i falowanie morza nie przekraczające 2 - 3°B;
- głębokość morza w rejonie pomiaru większa niż wartość obliczona z zależności (4.13);
- podniesienie wszystkich przyrządów opuszczonych poniżej linii wodnej (oprócz czujnika logu);
- do momentu rozpoczęcia pomiarów rozwinięcie przez okręt zadanej prędkości i utrzymywanie jej na całej długości przebiegu;
- długość odcinka pomiarowego oraz ilość przebiegów odpowiadające warunkom pomiarów;
- w czasie pomiaru utrzymywanie okrętu na kursie z dokładnością do  $\pm 2^\circ$ .

#### 4.2. Określenie niezbędnej długości przebiegu

Niezbędna długość odcinka pomiarowego, bez względu na to, czy pomiary będą dokonywane na mili pomiarowej czy w innych warunkach, zależy od wymagań dotyczących dokładności określenia prędkości okrętu oraz przebytej drogi. Długość ta powinna być optymalna. Przy zbyt krótkim przebiegu dokładność pomiarów może być niewystarczająca, przy zbyt długim - wprowadzie

zwiększa się, ale wydłuża się również czas trwania pomiarów, wskutek czego rosną koszty przedsięwzięcia.

Obliczając poprawkę logu sposobem pomiaru drogi (4.4) lub (4.5) błąd średni określenia poprawki logu można obliczyć według zależności:

$$\sigma_L = \frac{100 \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_{ROL}^2}}{S}, \quad (4.14)$$

gdzie:

$\sigma_L$  – błąd poprawki logu;

$\sigma_S$  – błąd średni długości drogi na jednym przebiegu;

$\sigma_{ROL}$  – błąd średni różnicy odczytów logu.

Przy wyborze długości przebiegu posługujemy się błędami granicznymi ( $p = 95\%$ ), które są równe podwójnej wielkości błędów średnich. Przy założeniu, że określenie poprawki logu na głównych prędkościach nastąpi z dokładnością do 0,5% i przyjęciu tej wielkości za błąd maksymalny w określeniu poprawki logu, wzór (4.14) przyjmie postać:

$$S = 200 \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_{ROL}^2}. \quad (4.15)$$

Długość linii przebiegu między nabieżnikami odcinającymi określa się metodami geodezyjnymi z bardzo dużą dokładnością. Błąd w określeniu długości przebiegu zależy od czułości pary nabieżników i w praktyce nie przekracza kilku metrów. Taką też wartość ma graniczny błąd określenia długości przebiegu  $\sigma_S$ , który dla uproszczenia obliczeń można pominąć.

Przy założeniu, że  $\sigma_S \approx 0$ , to wzór (4.15) przyjmie prostszą formę:

$$S = 200 \sqrt{\sigma_{ROL}^2}. \quad (4.16)$$



Ponieważ  $\sigma_{ROL} = \sqrt{\sigma_{OL_1}^2 - \sigma_{OL_2}^2}$ , przyjąwszy, że błędy określenia  $OL_1$  i  $OL_2$  są takie same, otrzymamy:

$$\sigma_{ROL} = \sqrt{2}\sigma_{OL}. \quad (4.17)$$

Współcześnie odczyt logu OL można określić z dokładnością do 0,01 (0,1 kabla). Podwójny błąd odczytu logu w tym przypadku wyniesie  $\sigma_{OL} = 0,05$  kabla czyli około 9,3 m. Podstawiając tę wartość do wzoru (4.17) otrzymamy:  $\sigma_{ROL} = 13,1$  m. Natomiast rozwiązując równanie (4.16) otrzymamy niezbędną długość przebiegu na linii pomiarowej:

$$S = 2\,620\text{ m} = 1,41\text{ mili morskiej}.$$

Długość powyższa jest niezbędna do określania poprawki logu z dokładnością 0,5%. Jeżeli przyjmiemy, że uściślamy poprawkę logu z mniejszą dokładnością, na przykład  $\pm 1\%$ , to niezbędna długość przebiegu zmniejszy się odpowiednio do 1 310 m (0,7 mili morskiej).

Aby wyznaczyć niezbędną długość linii przebiegu w zależności od prędkości okrętu, przez analogię można skorzystać ze wzoru:

$$S = \frac{V}{\sigma_V} \cdot \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2 \cdot V^2}, \quad (4.18)$$

gdzie:

$\sigma_V$  - błąd określenia prędkości okrętu na przebiegu;

$\sigma_t$  - błąd określenia czasu przebiegu między dwoma nabieżnikami.

Zgodnie z wymaganiami PRS i IMO prędkość okrętu powinna być określana z dokładnością do 0,1 węzła. Jeśli wielkość ta zostanie uwzględniona, wówczas wzór (4.18) przyjmie postać:

$$S = 10 \cdot V \cdot \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2 \cdot V^2} . \quad (4.19)$$

Przy założeniu, że dokładność określenia początku i końca linii przebiegu za pomocą nabieżników jest bardzo ścisła, dla uproszczenia obliczeń można przyjąć  $\sigma_s \approx 0$ . W tym wypadku:

$$S = 10 V^2 \sigma_t . \quad (4.20)$$

Przyjmując, że czas trwania przebiegu mierzy się z granicznym błędem równym 1,5 s, a zakładana dokładność określenia prędkości wynosi  $V/\sigma_V = 0,0005$  (0,5%), to ze wzoru (4.18) można otrzymać:

$$S = \frac{V}{12} . \quad (4.21)$$

Oznacza to, że dla określenia poprawki logu przy założonej prędkości okrętu niezbędna długość przebiegu  $S$  powinna odpowiednio wynosić:

|      |                  |                       |
|------|------------------|-----------------------|
| przy | $V \leq 12$ w.   | $S = 1$ mila morska;  |
|      | $V = 12 - 24$ w. | $S = 2$ mile morskie; |
|      | $V = 24 - 36$ w. | $S = 3$ mile morskie; |
|      | $V > 36$ w.      | $S = 4$ mile morskie. |

W praktyce należy porównać obliczone wartości niezbędnej długości przebiegu według zmierzonych odległości i prędkości, po czym do realizacji przyjąć wartość większą.

### 4.3. Pomiary prędkości i poprawki logu radarem

Prędkość okrętu w przypadku danych nastaw silników głównych oraz błęd (także poprawka) logu nie są wielkościami stałymi, lecz zmieniają się w czasie wskutek działania różnych czynników. Aby były wiarygodne, muszą być regularnie określone i sprawdzane. Nie zawsze możliwe jest wykonanie takiego sprawdzianu na mili pomiarowej. Prędkość okrętu oraz poprawkę logu z dostateczną dokładnością można określić za pomocą radaru okrętowego, zwłaszcza używając ruchomego znacznika odległości.

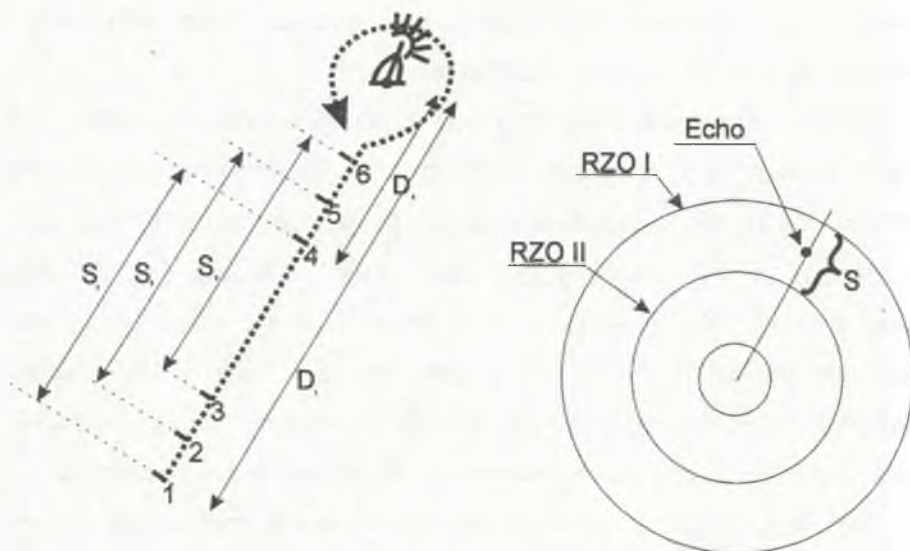
Wartość rzeczywistej odległości przebytej przez okręt stanowi różnica jego odległości (zmierzonej radarem) do punktu obserwacyjnego na początku i końcu przebiegu. Kąt kursowy na punkt orientacyjny powinien wynosić  $000^{\circ}$  lub  $180^{\circ}$ . W stosunku do rejonu obowiązują takie same wymagania jak do mili pomiarowej. W celu zwiększenia dokładności ustalania czasu zaleca się wykonywać pomiar za pomocą trzech sekundomierzy. Radar należy włączyć odpowiednio wcześniej, by jego podzespoły były rozgrzane. Zasięg ustawia się na najmniejszy podzakres i w czasie trwania pomiarów nie wolno go zmieniać.

Do przeprowadzania pomiarów wybiera się punkt orientacyjny dający wyraźne echo na ekranie radaru. Może to być znak nawigacyjny na lądzie, latarniowiec lub pława z reflektorem radarowym itp.

Aby zminimalizować działanie prądu lub wiatru, jeśli jest to możliwe, należy wykonać trzy przejścia na każdym kursie. Kierunek przejścia powinien się pokrywać z kierunkiem przeważających prądów i wiatrów.

W ramach przystępowania do pomiarów okręt kładzie się na kursie prowadzącym do punktu orientacyjnego i rozwija określoną prędkość. Gdy zbliży się do punktu oddalonego od znaku o założoną wcześniej odległość  $D_1$ , czyli zewnętrzna krawędź znacznika odległości dotknie punktu, należy włączyć pierwszy sekundomierz. Następnie, zmniejszając dwa razy odległość do punktu o jeden lub dwa kable, włącza się odpowiednio drugi i trzeci stoper.

Kolejną czynnością jest ustawienie ruchomego znacznika odległości na odległość mniejszą od początkowej o długość wymaganego przebiegu  $D_4$  - zależnie od prędkości. Po dojściu na nową odległość do punktu obserwacyjnego zatrzymuje się pierwszy sekundomierz, następnie dwukrotnie zmniejszając odległość o jeden lub kable (wartość, jaka była przyjęta na początku pomiarów) zatrzymuje się drugi i trzeci stoper (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Określanie poprawki logu przy wykorzystaniu radaru okrętowego

Jeżeli poprawkę logu określa się według odczytów logu, to obserwator - w momencie dotknięcia przez ruchomy znacznik odległości punktu obserwacyjnego - zapisuje wskazania  $OL_1$  a następnie  $OL_2$  i  $OL_3$ , włączając w sposób opisany wcześniej sekundomierze, kolejno: pierwszy, drugi i trzeci. Po przejściu zadanej długości przebiegu zapisuje się wskazania logu  $OL_4$ ,  $OL_5$  i  $OL_6$  oraz zatrzymuje odpowiednie sekundomierze.

Kiedy pomiary na pierwszym przebiegu zostaną zakończone, okręt kładzie się na kontrkurs i wykonuje czynności analogicznie jak podczas pierwszego przejścia.



Opracowanie danych i obliczenie poprawek wykonuje się według przedstawionego poniżej schematu. W pierwszej kolejności należy obliczyć średnie wartości przebytych odległości i różnicy odczytów logu:

$$S_i = D_{Pi} - D_{Pi+3}, \quad (4.22)$$

$$ROL_i = OL_{i+3} - OL_i, \quad (4.23)$$

$$S = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}, \quad (4.24)$$

$$ROL = \frac{ROL_1 + ROL_2 + ROL_3}{3}. \quad (4.25)$$

Przeprowadzenie trzykrotnych pomiarów drogi i odczytów logu powoduje znaczne zmniejszenie przypadkowych błędów obserwacji. Jeżeli jednak w miejscu pomiarów występuje znos większy niż  $2^\circ$ , wówczas należy poprawić otrzymane długości przebiegu dodając do odległości  $D_{P4}$ ,  $D_{P5}$  oraz  $D_{P6}$  wartości:

$$\Delta D_i = D_{Pi} (\cos \alpha_i - 1), \quad (4.26)$$

gdzie

$\alpha_i$  - kąt kursowy na i-ty punkt orientacyjny w momencie pomiaru końcowych odległości.

Niektórzy autorzy sugerują, iż jeżeli w rejonie pomiarów nie można obrać stałego punktu orientacyjnego stanowiącego odnośnik pomiaru odległości, to jako obiekt obserwacji można wykorzystać lekką pływającą wiechę z reflektorem radarowym. Prawie całkowicie wyklucza to bowiem działanie prądu morskiego na kadłub okrętu. Sposób ten jest wygodny do określania poprawki logu na pełnym morzu przy sprzyjających warunkach hydrometeorologicznych, to znaczy

do stanu morza 2<sup>o</sup>B. Można przyjąć, że dokładności takich pomiarów (wykonywanych względem pław lub wiech) są porównywalne i wynoszą: prędkość - 0,1 węzła; przebyta droga - 0,5%. Nasuwa się wniosek, że sposób określania poprawki logu według zmierzonych prędkości czy odległości w stosunku do swobodnie pływającej wiechy jest pewny i może być stosowany w każdym akwenie przy sprzyjających warunkach hydrometeorologicznych - jako bardzo wygodny w codziennym stosowaniu. Jednak wątpliwe jest, by na okręcie przewożono wiechę w celu wykonywania pomiarów podczas przejścia morzem, a próby prędkości i regulacje logu jednak częściej będą przeprowadzane na mili pomiarowej. Wobec tego powyższy sposób traktować należy jako wyjątkowy.

Długość przebiegu niezbędną do określenia poprawki logu z założoną dokładnością oblicza się ze wzorów (4.16) i (4.22). Z zależności (4.14) wynika, że wielkość błędu w określaniu poprawki logu jest odwrotnie proporcjonalna do długości odcinka pomiarowego. Zwiększanie długości linii pomiarowej nie jest jednak wskazane ze względu na czas trwania pomiarów, związane z tym koszty oraz konieczność zmiany zasięgu radaru, co powoduje intensyfikację ilości błędów pomiaru.

Na 3-6 - milowej skali radaru, którą najlepiej jest stosować do określania poprawki logu, odległości do obiektów punktowych (boja, pława) obliczane są z błędem nie przekraczającym kilkudziesięciu metrów (30 – 50 m). Systematyczne błędy określenia odległości  $D_p$  przez radar nie wpływają na dokładność określania długości linii przebiegu  $S$ , gdyż powodują one jednakowe „skażenie” odległości początkowej i końcowej.

Ze wzoru (4.14) wynika, że długość przebiegu zależy od wymaganej dokładności określenia poprawki logu. W tabeli 4.1 przedstawiono zależność długości przebiegu od wymaganej dokładności błędów logu, przy założonym granicznym błędzie określenia długości przebiegu  $\sigma_S = 30$  m i 50 m oraz dokładności odczytu 0,01 mili morskiej ( $\sigma_L = 9,3$  m).

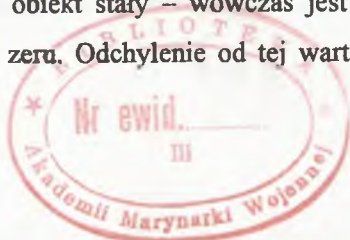
Tabela 4.1. Zależność długości przebiegu od wymaganej dokładności poprawki logu

| Lp. | Błąd określenia $\Delta \log$<br>[%] | Niezbędna długość przebiegu<br>w milach morskich |                           |
|-----|--------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|
|     |                                      | $\sigma_S = 30 \text{ m}$                        | $\sigma_S = 50 \text{ m}$ |
| 1.  | 0,5                                  | 4,8                                              | 7,7                       |
| 2.  | 1,0                                  | 2,4                                              | 3,9                       |
| 3.  | 1,5                                  | 1,6                                              | 2,6                       |
| 4.  | 2,0                                  | 1,2                                              | 1,9                       |

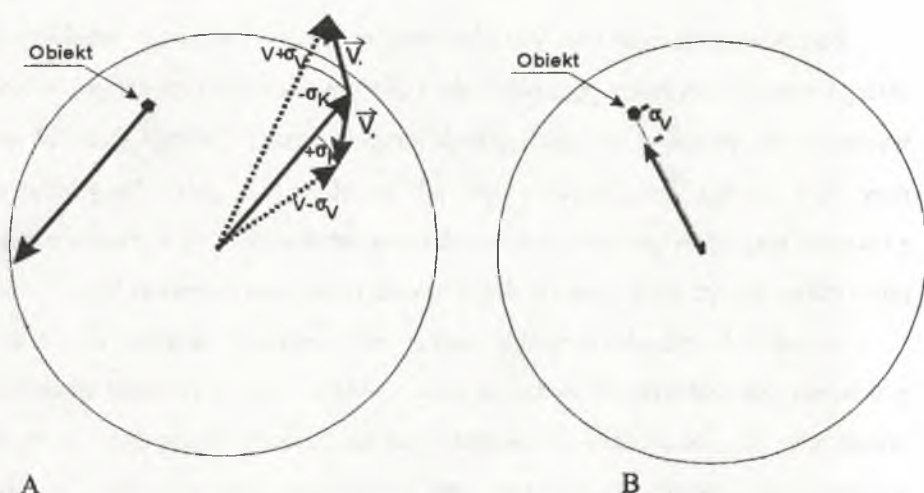
Ponieważ poprawka logu jest określana na dwóch lub trzech przebiegach, dlatego w celu otrzymania poprawki logu z błędem nie większym niż  $\sigma_{AL} = 0,5\%$  wystarczy na dwóch przebiegach przejść długość równą 3,4 mili (lub 5,4 mili przy  $\sigma_S = 50 \text{ m}$ ), a na trzech - 2,9 mili morskiej (4,6 mili). Decydując się z różnych względów na zmniejszenie długości przebiegów lub ograniczenie ich ilości należy liczyć się z mniejszą dokładnością określenia poprawki logu.

Na współczesnych okrętach coraz powszechniej stosuje się radary z układem automatycznego śledzenia echa – ARPA. Jest to również doskonałe urządzenie do określania prędkości, jednak należy korzystać z niego w specyficzny sposób. Funkcjonuje ono poprawnie tylko wówczas, gdy jest sprzężone z okrętowym kompasem i logiem. Jego działanie polega bowiem na obliczaniu rzeczywistego kursu oraz prędkości wskazanego przez operatora obiektu. Ponieważ radar na okręcie umożliwia określenie tylko wektora ruchu względnego, to w celu obliczenia wektora ruchu rzeczywistego obiektu niezbędne jest dokonanie obliczeń z uwzględnieniem informacji o ruchu własnym. Pozornie jednak jest to zadanie niewykonalne, skoro do tego rodzaju obliczeń niezbędna jest informacja o prędkości własnej.

Zakładając, że ARPA funkcjonuje poprawnie, zadanie to można rozwiązać wskazując urządzeniu obiekt, którego prędkość znamy. Jeżeli wynik obliczeń będzie różny od wartości prędkości obiektu, to można obliczyć błąd logu. Najłatwiej do tej roli przyjąć obiekt stały – wówczas jest oczywiste, że jego prędkość powinna być równa zero. Odchylenie od tej wartości jest informacją



o błędzie logu, jednak nie można tej informacji transponować wprost na błąd logu. Wektor prędkości rzeczywistej jest bowiem efektem rozwiązania trójkąta wektorowego, dlatego wynik różny od zera może być rezultatem błędów logu oraz kompasu, a wektor wynikowy może mieścić się w przedziale od  $V_1$  do  $V_2$  (rys. 4.3.A). Jednakże w przypadku, gdy kurs okrętu będzie pokrywał się z kierunkiem na obiekt, wówczas błędy wynikać będą tylko z dokładności logu (rys. 4.3.B).



Rys.4.3. Wykorzystanie urządzenia ARPA do określania błędów logu

Innym sposobem jest ręczne wprowadzenie do urządzenia ARPA prędkości własnej równej zeru. Wówczas wektor ruchu nieruchomego obiektu zostanie określony przez urządzenie tak, że wartość prędkości będzie równa prędkości okrętu, a kurs będzie różnił się od kursu okrętu o  $180^\circ$ . Oba sposoby mogą być bardzo przydatne w trakcie żeglugi w wąskich przejściach, gdy tory wodne są oznakowane przez zakotwiczone obiekty pływające (pławy torowe) lub dalby, jednak z równym powodzeniem jako tego typu obiekty można wybrać główki wejściowe do portu lub statek zakotwiczony na redzie. Dokładność takich pomiarów wynika z dokładności urządzenia ARPA i może być oceniona na 0,5 w.



#### 4.4. Wykorzystanie systemów radionawigacyjnych

Rzeczywistą prędkość okrętu, tak jak błędy logu, można określić za pomocą dowolnego nawigacyjnego systemu pozycyjnego zapewniającego określenie pozycji okrętu z dostateczną dokładnością. Jak wyżej wspomniano, podstawowym problemem dotyczącym tego typu pomiarów jest precyzyjne określenie rzeczywistej długości przebiegu, co wymaga bardzo dokładnego określenia pozycji okrętu na początku i końcu linii przebiegu. Długość przebiegu  $S$  określa się jako odległość między dwoma pozycjami obserwowanymi.

Sam sposób wykonywania pomiarów nie różni się od metod opisanych powyżej. Pomiarów dokonuje się przy kilku (zazwyczaj trzech) prędkościach okrętu lub prędkościach, dla których krzywa błędów logu ma punkty charakterystyczne.

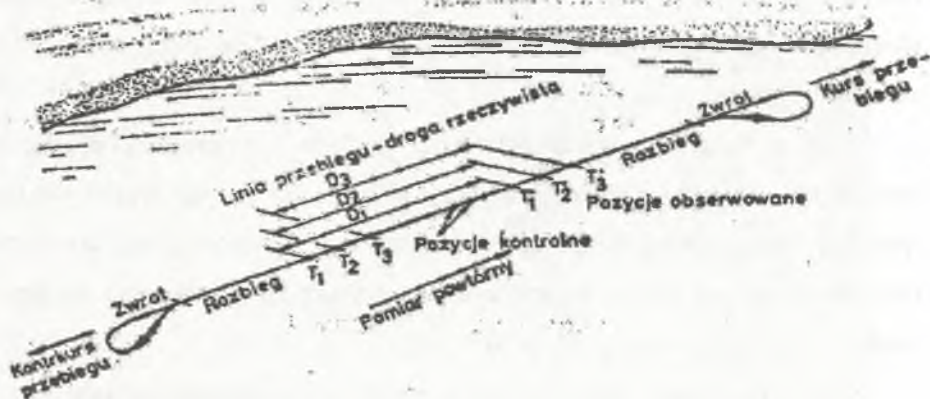
Podczas wykonywania pomiarów należy wykonać dwa przebiegi dla każdej prędkości i obliczyć prędkość średnią, aby wyeliminować wpływ wiatru (podobne postępowanie jak np. na mili pomiarowej). Jeżeli w rejonie pomiarów stwierdzono istnienie prądu, trzeba wykonać trzy przebiegi obliczając następnie prędkość średnią ze wzoru (4.8), (4.9).

Przebieg pomiarów może być przedstawiony według poniższego schematu.

1. Okręt na kursie A rozwija prędkość, przy której będzie określana poprawka logu.
2. W momencie określenia pozycji  $P_1$  przez system nawigacyjny należy dokonać jednocześnie zapisu odczytu logu  $OL_1$  i włączyć pierwszy sekundomierz. Ważne jest, by obie czynności zostały wykonane jednocześnie (w celu uniknięcia dodatkowych błędów).
3. W celu zwiększenia dokładności pomiarów na jednym kursie można wyznaczyć trzy linie przebiegów ( $D_1$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ) przesunięte względem siebie o jednakowy odstęp czasu  $T_1-T_2$  oraz  $T_2-T_3$  (rys. 4.4).

Przy określaniu pozycji początku przebiegu  $P_2$ , a następnie  $P_3$ , należy uruchomić kolejno drugi i trzeci sekundomierz, odczytując jednocześnie z licznika przebytej drogi  $OL_2$  i  $OL_3$ . Identyczne czynności należy wykonać przy określaniu pozycji końca przebiegu, tj.  $P_4$ ,  $P_5$  i  $P_6$ , zatrzymując kolejno odpowiednie sekundomierze i odczytując wskazania logu  $OL_4$ ,  $OL_5$  i  $OL_6$ . Wszystkie te czynności należy powtórzyć przy drugim i trzecim przebiegu.

Kolejną czynnością jest obliczenie średnich wartości wielkości potrzebnych do określenia poprawki logu wg wzorów (4.6) - (4.9).



Rys.4.4. Zasada określania poprawki logu i prędkości okrętu za pomocą systemu radionawigacyjnego

Jedną z ważniejszych czynności podczas określania poprawki logu za pomocą nawigacyjnych systemów pozycyjnych jest określenie niezbędnej długości przebiegu na jednym halsie. Oblicza się ją korzystając ze wzoru (4.16) lub (4.19). Jeżeli długość ta jest mniejsza od obliczonej sposobem (4.21), wówczas przyjąć należy wartość większą.

Jak wynika ze wzoru (4.15), przy założonej dokładności określenia poprawki logu równej 0,5% oraz błędzie w określeniu różnicy wskazań logu ROL, niezbędna długość przebiegu będzie zależeć wyłącznie od dokładności określenia pozycji okrętu.

Aktualnie w obrębie całej polskiej strefy ekonomicznej stosowane są następujące radionawigacyjne systemy cywilne i wojskowe:

GPS (i DGPS), GLONASS, DECCA, AD-2, SYLEDIS, FALCON 484,  
POLARTRACK, BRAS.

System GPS staje się podstawowym systemem określania pozycji w nawigacji morskiej. Powszechnie dostępne odbiorniki przystosowane do odbioru sygnałów na częstotliwości  $L_1$  (1575,42 MHz) z kodem C/A zapewniają dokładność określania pozycji rzędu 100 metrów ( $p = 0,95$ ). Oprogramowanie dostępnych odbiorników GPS umożliwia również określenie na bieżąco prędkości przemieszczania się okrętu nad dnem z błędem rzędu 0,5 węzła, jednak na pomiary te w znacznym stopniu mają wpływ skutki stosowania algorytmów filtracji pomiarów. W efekcie odczyty prędkości wykazują duże błędy przez pierwszych kilkanaście minut po zmianie kursu lub prędkości okrętu. Można przyjąć, że stabilizują się dopiero po upływie kwadransa. Zagadnienie to zostanie bardziej szczegółowo omówione w innym rozdziale niniejszego podręcznika.

System DGPS dostępny jest w obrębie całej polskiej strefy ekonomicznej oraz poza nią dzięki istnieniu kilku stacji odniesienia w Polsce i na wybrzeżu państw sąsiednich. Dokładność określenia pozycji za pomocą tego systemu zależy od własności stacji odniesienia i rodzaju odbiornika użytkownika, a częściowo również od warunków propagacji oraz odległości od stacji odniesienia. Dotychczasowe badania wykazały, że dokładność określenia pozycji odbiornikiem DGPS waha się w przedziale od dwóch do siedmiu metrów.

GLONASS jest systemem stadiometrycznym, którego zasada działania jest bliźniaczo podobna do GPS. System znajduje się w fazie wdrażania. Dokładność określenia pozycji jest większa niż w przypadku wersji systemu GPS z ograniczoną dostępnością i wynosi około 40 - 60 metrów. System ten może mieć duże znaczenie w przyszłości w związku z faktem zadeklarowania przez Rosję udostępnienia go szerokiemu gronu użytkowników. Jednak w chwili oddawania tego podręcznika do druku odbiorniki systemu GLONASS były nadal trudno dostępne.

Radionawigacyjny system hiperboliczny DECCA można stosować w całej strefie południowego Bałtyku korzystając z łańcucha 0A. Dokładność określenia pozycji zależy od pory roku i doby, długości baz, kąta widzenia linii baz z pozycji odbiornika, szerokości geograficznej, kątów przecięcia się linii pozycyjnych a także współczynnika korelacji między liniami pozycyjnymi. Dokładność ta w dzień, czyli w najkorzystniejszej porze propagacji (tzw. *Full Daylight*), w rejonie środkowego wybrzeża wynosi 100 - 150 m ( $p = 0,95$ ). O tej samej porze dokładność w rejonie Zatoki Gdańskiej wynosi 200 m a Zatoki Pomorskiej 500 m. W każdym innym okresie dokładność określenia pozycji będzie mniejsza.

Dodatkowym utrudnieniem w wykorzystywaniu omawianego systemu jest konieczność stosowania specjalnej mapy w przypadku starych typów odbiorników. W takiej sytuacji na dokładność określenia pozycji ujemnie wpływa precyzja wykonania prac graficznych na mapie. Jednak należy dodać, że stosunkowo szeroko stosowane są również odbiorniki nowej generacji, w których elementy czynności związanych z określaniem prędkości okrętu lub poprawki logu są zaprogramowane, co ułatwia pracę nawigatora oraz wpływa korzystnie na zwiększenie dokładności określenia przebytej drogi.

System AD - 2 funkcjonuje obecnie jako element osłony radionawigacyjnej Zatoki Gdańskiej. W głównej mierze wykorzystywany jest do kontroli oznakowania nawigacyjnego oraz nadzorowania prac hydrograficznych. Dokładność określenia pozycji zależy od odległości do stacji odniesienia; w rejonie całej Zatoki Gdańskiej wynosi 1 - 7 m.

System SYLEDIS w polskiej strefie wykorzystywany jest przez urzędy morskie i przedsiębiorstwo Petrobaltic. Stacje łańcucha tego systemu są ustawiane doraźnie w zależności od miejsca zabezpieczenia prac. W zasięgu horyzontu błąd pozycji wynosi ok. 3 m, na krańcach zasięgu (do 300 km od stacji) błąd ten wzrasta do 20 m.

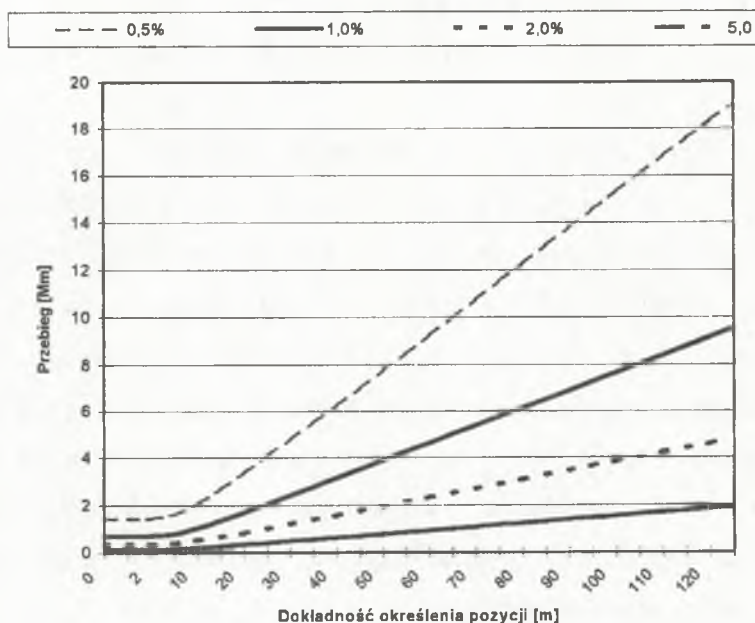
System FALCON 484 wykorzystywany jest do zabezpieczenia prac hydrograficznych przez Bazę Oznakowania Nawigacyjnego Urzędu Morskiego



w Szczecinie. Dokładność określenia pozycji zależy od geometrii systemu i wynosi 2 - 10 m.

POLARTRACK jest laserowym systemem przenośnym mierzącym odległości i kierunek na obiekt, na którym ustawiony jest specjalny odbłyśnik (system luster). System ten posiadają urzędy morskie w Gdyni i Szczecinie. Wykorzystywany jest do zabezpieczenia doraźnych pomiarów do odległości 10 km z błędami poniżej metra.

Radionawigacyjny system hiperboliczny BRAS stosowany jest przez marynarkę wojenną, przede wszystkim w rejonie Zatoki Gdańskiej. Jest systemem mobilnym, uruchamianym okresowo - w zależności od potrzeb. Zapewnia zasięg do 200 km; błędy określenia pozycji zawierają się w granicach 10 - 24 m.



Rys 4.5. Zależność długości przebiegu od dokładności określenia pozycji okrętu

Uwzględniając przyjęte dokładności określenia pozycji początku i końca przebiegu oraz obliczony wcześniej błąd określenia różnicy odczytów logu

$\sigma_{ROL} = 13,1$  m, przedstawiono na wykresach niezbędne długości przebiegu na linii pomiarowej - obliczone według wzoru (1.14), przy założeniu, iż dokładności określenia poprawki logu  $\sigma_L$  wynoszą odpowiednio: 0,5%, 1%, 2% i 5%.

Wiele spośród wspomnianych systemów wymaga stosowania map z naniesionymi siatkami linii pozycyjnych. W przypadku uwzględniania pozycji z mapy nawigacyjnej we wzorach na długość przebiegu (4.16 lub 4.19) błąd graniczny określenia pozycji należy obliczyć według zależności:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{SI}^2 + \sigma_{GR}^2 + \sigma_C^2}, \quad (4.27)$$

gdzie:

$\sigma_{SI}$  - błąd określania pozycji systemem radionawigacyjnym;

$\sigma_{GR}$  - błąd naniesienia pozycji na mapę;

$\sigma_C$  - błąd nakłucia cyrkla przy pomiarze długości z mapy.

W praktyce przyjmuje się, że błąd  $\sigma_{GR} = 1,4s$  [mm] zaś  $\sigma_C = 0,4s$  [mm] (gdzie  $s$  - skala mapy, na której określa się pozycję okrętu). Stosowane najczęściej mapy systemu DECCA a także systemu BRAS wykonane są w skalach 1:100 000 lub 1:200 000. W takim wypadku  $\sigma_{GR}$  mieści się w granicach 280 m - 140 m, a  $\sigma_C$  - 40 - 80 m. Są to wartości znaczące w porównaniu z dokładnościami samych systemów. Należy z tego wnioskować, że stosowanie starych typów odbiorników, zwłaszcza w przypadku systemu DECCA, nie jest uzasadnione. Natomiast, jeśli takie urządzeń (np. PIRS) na okręcie się znajdują, należy raczej dążyć do wykonania pomiarów za pomocą innego systemu określania pozycji.

Na przykład, aby określić poprawkę logu z błędem równym 1% przy  $\sigma_{ROL} = 13$  m, długość przebiegu winna wynosić ponad 20 mil morskich dla systemu DECCA i około 11 mil dla BRAS. Przy tak długich liniach przebiegu trudno zachować na ich całej długości warunki niezbędne do rzetelnego pomiaru; ponadto koszty są niewspółmiernie wysokie w stosunku do efektów.

Jak wynika z przedstawionych wyliczeń, wpływ na obliczaną długość przebiegu ma skala mapy, która do dokonywania pomiarów poprawki logu jest za duża. Gdyby dla wyżej wymienionych systemów wykonać w skali (np. 1:20 000) planszę z naniesionymi hiperbolami, to długość przebiegu przy wcześniej przyjętych warunkach zmniejszy się do przedziału 5 - 10 Mm. Przed „erą” GPS takie rozwiązanie było niekiedy atrakcyjne, gdyż wyznaczając kursy przebiegu wzdłuż linii pozycyjnych jednego koloru można było inne, przecinające je, traktować jako nabieżniki odcinające. Wówczas długość przebiegu, tzn. odległość między początkową i końcową hiperbolą (kilka ścieżek), oblicza się analitycznie co 0,005 mili. Jeśli pozycja okrętu na początku i końcu przebiegu będzie określona z dokładnością 1,5 - 3 kbl, to w rezultacie przemieszczania się okrętu w sposób opisany powyżej długość przebiegu można określić z dokładnością 5 - 10 m. Zejście okrętu z kursu w granicach  $\pm 3^\circ$  powoduje zwiększenie długości przebiegu nie więcej niż o 5 m.

Jak wynika z powyższego, siatka izolinii systemu DECCA i BRAS okazuje się doskonałym poligonem pomiarowym z nieograniczoną ilością nabieżników - hiperbol, których przecięcie odnotowywane jest na wskaźnikach fazomierzy. Przy określaniu poprawki logu z błędem równym 1% przy odczytach ROL z rozdzielczością do 0,01 Mm wymagana długość przebiegu zmniejszała się do kilku mil. W przypadku pojawienia się trudności z zapewnieniem odpowiednich głębokości (zwłaszcza dla dużych statków) metoda taka stawała się atrakcyjna. Ponadto można było ją zastosować w trakcie przejścia morzem, gdy pojawiały się wątpliwości dotyczące poprawnego funkcjonowania logu i następowała pilna potrzeba przeprowadzenia pomiarów kontrolnych.

Określenie poprawki logu w omawianym przypadku można zrealizować następująco:

1. Po uzyskaniu przez okręt zadanej prędkości, w momencie kiedy dłuższa wskazówka fazomierza pokaże zero, należy włączyć sekundomierz. Jednocześnie zapisuje się odczyt drugiego fazomierza i wskazania licznika logu OL<sub>1</sub>.

2. Dalsze postępowanie jest identyczne jak na opisanej wcześniej mili pomiarowej. Po przejściu przez okręt niezbędnej długości przebiegu (kilku ścieżek), gdy wskazówka tego samego fazomierza pokaże 0, należy zatrzymać sekundomierz notując odczyt logu OL<sub>2</sub> oraz wskazania drugiego fazomierza.
3. Po zakończeniu pomiarów na jednym przebiegu okręt wykonuje zwrot na kontrkurs i powtarza pomiary.
4. Jeżeli w rejonie pomiarów występują prądy, to powinien być wykonany trzeci przebieg. Dla zwiększenia dokładności pomiarów można dokonywać trzech zapisów na początku i końcu linii przebiegu przesuając je w czasie o 0,1 - 0,2 cyklu fazowego.

#### 4.5. Wykorzystanie systemu GPS do pomiarów prędkości

Współczesne odbiorniki większości systemów radionawigacyjnych, a w szczególności GPS, zaprogramowane są w ten sposób, że wskazują na bieżąco kurs oraz prędkość względem dna. Należy jednak wyraźnie podkreślić, iż informacje o ruchu okrętu stanowią w takich sytuacjach komunikat o ruchu względem dna morskiego, nigdy względem wody. Nawet, gdy kurs jest przedstawiony jako magnetyczny (a często taka opcja jest dostępna), nie można go porównywać ze wskazaniem kompasu magnetycznego, bowiem ten informuje nas o zorientowaniu płaszczyzny diametralnej okrętu względem bieguna magnetycznego (kurs, ang. *Heading*). Natomiast odbiornik systemu radionawigacyjnego informuje nas o tym, jak przebiega droga przebyta przez okręt (KDd, ang. *Cours*).

Popularnie mówi się o tych systemach, że służą do określania współrzędnych pozycji. Jednak poprawniej byłoby stwierdzić, że podstawowym ich zadaniem jest określanie wektora stanu okrętu. Pojęcie wektor stanu okrętu oznacza więcej niż pozycję. W praktyce bowiem określa osiem wielkości



opisujących pozycję okrętu: trzy współrzędne geometryczne opisujące położenie okrętu względem Ziemi (szerokość geograficzną, długość geograficzną oraz wysokość względem elipsoidy będącej modelem Ziemi), jedną współrzędną systemową (czas systemu GPS) oraz pierwsze pochodne tych wielkości:

$$u = U(\varphi, \lambda, h, t, \dot{\varphi}, \dot{\lambda}, \dot{h}, \dot{t}). \quad (4.28)$$

Należy zwrócić uwagę, że mając pochodne szerokości geograficznej oraz długości geograficznej stosunkowo łatwo obliczyć prędkość i kurs okrętu. Należy jednak podkreślić, że obie wielkości są odniesione do dna, nie do wody. Wektor stanu opisany zależnością (4.28) jest zwykle wynikiem rozwiązania tzw. filtru Kalmana; nie jest to więc prosty wynik dzielenia przebytej odległości przez czas!

W niniejszym opracowaniu nie będziemy zajmowali się szczegółami powyższego zagadnienia. Czytelnik zainteresowany tą problematyką powinien skorzystać z bogatej literatury opisującej szeroko zagadnienia filtracji, również w odniesieniu do nawigacji. W zagadnieniu filtracji istotne jest wielostronne uwzględnianie wielu wykonanych dla momentu  $t$  pomiarów, matematycznego opisu procesu ruchu obiektu nawigacji oraz procesu losowego, którym jest nakładanie się na wykonywane pomiary wszelkiego typu zakłóceń. W efekcie następuje swego rodzaju „wygładzanie” wyników z uwzględnieniem przeszłości mierzonego procesu. Inaczej mówiąc, kolejne wartości przedstawiane przez urządzenie, w wyniku zastosowania algorytmu filtracji, w pewnym stopniu uwzględniają procesy, które zachodziły przez określony czas przed dokonaniem konkretnego pomiaru.

Wynika z powyższego, że filtr Kalmana doskonale sprawdza się w warunkach, gdy mierzony proces przebiega stabilnie; natomiast w momencie wprowadzenia zmiany potrzebny jest czas na unormowanie się tegoż procesu. Innymi słowy, po zmianie w parametrach ruchu okrętu, kursie lub prędkości, wartości wskazywane przez omawiany odbiornik są mniej dokładne niż przed wprowadzeniem tejże zmiany. Następnie, po upływie określonego czasu

wykazywane dokładności ponownie stabilizują się. Stopień uwzględniania przeszłości procesu oraz czas osiągania stabilizacji filtru są zmienne i zależą od zmiany parametrów ruchu okrętu a także konkretnego typu urządzenia; często mogą być także zmieniane przez operatora. Zachodzi jednak pewna ogólna prawidłowość, że im bardziej uwzględniana jest przeszłość procesu, tym skuteczniejsza jest filtracja. Jednocześnie jednak dłużej trwa wówczas proces stabilizacji filtru.

Z powyższego wynika wniosek, iż nieprawdą są propagowane niekiedy poglądy, że prędkość określana przez odbiornik GPS charakteryzuje się błędem 0,1 w.! Jest to wyłącznie efekt rozdzielczości wyświetlania wyniku. W rzeczywistości wskazanie tej prędkości charakteryzuje się większym błędem, który dodatkowo jest zmienny, szczególnie po zmianach kursu lub prędkości.

Pomimo powyższego, posiadanie odbiornika GPS wiąże się z dostępnością informacji o prędkości względem dna, byłoby więc błędem z tego nie korzystać. Możliwe jest również wykorzystanie tej informacji do kontroli poprawności funkcjonowania logu.

Porównując wskazania logu i odbiornika radionawigacyjnego nowej generacji należy uwzględnić fakt, że jeden wskazuje prędkość rzeczywistą a drugi (zazwyczaj) prędkość po wodzie. Ponadto, nie jest poprawną praktyką porównywanie wskazań prędkości, bowiem istnieje wówczas możliwość zestawienia wyłącznie prędkości chwilowych, które mogą w danym momencie różnić się od wartości prawdziwych. Za poprawne należy uznać dokonywanie pomiarów metodami opisanymi powyżej - poprzez pomiar drogi. W przypadku współczesnych odbiorników systemów radionawigacyjnych, w szczególności systemu GPS, istnieje zazwyczaj możliwość uruchomienia specjalnego licznika przebytej drogi, co ułatwia pomiary. Jeżeli odbiornik nie ma takiej opcji, wówczas należy z niego odczytać wskazania przebytej drogi na początku i na końcu pomiaru i na tej podstawie obliczyć przebytą drogę rzeczywistą (dokładniej - według systemu radionawigacyjnego).

Stosunkowo prosty jest pomiar poprzez wyzerowanie (zresetowanie) omawianego licznika w odbiorniku w momencie przeskoku w logu licznika

przebytej drogi. Do pomiarów za pomocą odbiornika GPS nie jest konieczna informacja o czasie, gdyż poprawkę logu można obliczyć z zależności (4.5). Natomiast wartość prędkości, której odpowiada tak określona poprawka logu, może być obliczona na podstawie prędkości wskazywanej przez odbiornik GPS. Jeśli jednak zamierzamy skorzystać z zależności (4.4) należy uruchomić stoper. Po przebyciu odcinka drogi, którego długość zależna jest od prędkości okrętu zgodnie z zależnością (4.12), należy w odbiorniku GPS zatrzymać licznik oraz stoper a także odczytać ROL.

Wskazane jest, aby zachować odpowiednie warunki opisane dla przypadku pomiarów dokonywanych na mili pomiarowej. Ponieważ najczęściej takie badania są wykonywane na pełnym morzu, to zazwyczaj nie ma trudności z zachowaniem odpowiednich głębokości, jednak należy upewnić się, czy nie występuje dryf i znos. Jest to o tyle ułatwione, że odbiornik GPS określa również kąt drogi względem dna. Wystarczy więc porównać tę informację z kursem rzeczywistym ustalonym na podstawie odczytów kompasu (z uwzględnieniem odpowiednich poprawek).

Jak opisywano w powyższych podrozdziałach dotyczących podobnych pomiarów za pomocą radaru lub innych systemów radionawigacyjnych, korzystnie jest dokonać więcej niż jednego pomiaru. W tym celu, po przebyciu określonego odcinka według licznika przebytej drogi odbiornika systemu, na przykład 0,5 Mm, należy uruchomić kolejny stoper i odczytać wskazania logu. Podobne postępowanie wskazane jest po przebyciu kolejnego odcinka. Następnie należy dokonać odczytów logu i zatrzymać pomiar czasu na odpowiednich stoperach w momentach, gdy okręt przechodzi przez punkty końcowe odcinków pomiarowych - analogicznie do sytuacji przedstawionej na rys. 4.4.

Dokonując takich pomiarów należy mieć świadomość, że błąd pozycji systemu GPS należy oceniać na 100 m, co stanowi wartość zbyt dużą dla tego typu pomiarów. W krótkim przedziale czasu błędy te mogą być mniejsze, jednak nie można przewidzieć ich skokowych zmian, dlatego raczej nie można zalecać wykorzystywania systemu GPS. Ze względu na powszechną dostępność wersji różnicowej (DGPS) na Bałtyku należy raczej korzystać z tej możliwości.





Rys. 4.6. Przykład pomiarów systemem GPS na cyrkulacji

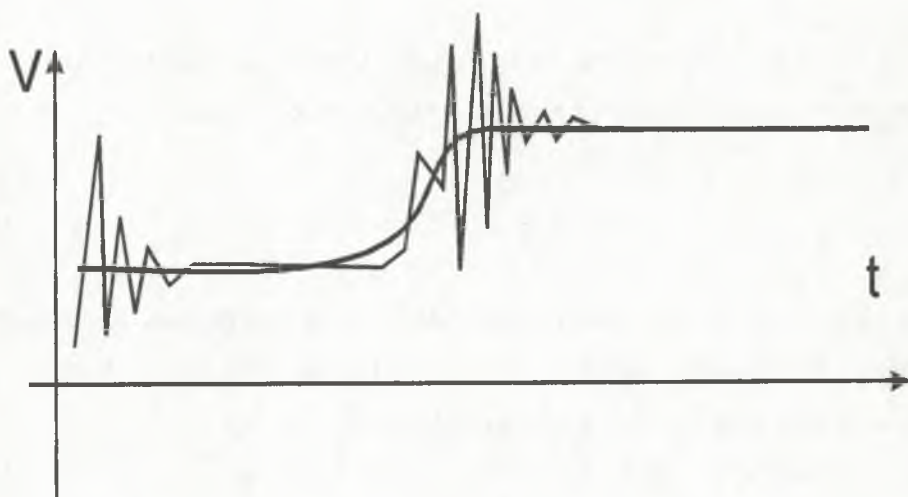
Najbardziej specyficznym zagadnieniem w przypadku określania poprawki logu na podstawie pomiarów GPS jest zapewnienie stabilności pracy filtru Kalmana. Dla zobrazowania, jak w przypadku wykonywania manewrów informacja ta może odbiegać od rzeczywistości, przedstawiono (rys.4.6) wykres cyrkulacji okrętu oraz równoległe rejestrowane pozycje GPS. Średnica cyrkulacji przedstawiona na rysunku wynosi około 0,5 Mm.

Należy zwrócić uwagę, że poszczególne modele odbiorników wykazują różne stałe czasowe zastosowanych filtrów i zazwyczaj mają w tej dziedzinie kilka opcji. W związku z tym, w przypadku prowadzenia pomiarów za pomocą odbiornika systemu satelitarnego, wskazane jest stosować warianty, które w trakcie przetwarzania pomiarów w mniejszym stopniu uwzględniają przeszłość.

Z rozkładu pozycji na rysunku 4.6 można również wnioskować, w jakim stopniu zmienne są prędkość i kurs ustalone przez odbiornik w poszczególnych etapach eksperymentu. Należy również brać pod uwagę fakt, że powyższy eksperyment był realizowany za pomocą odbiornika GPS. W przypadku wersji DGPS błędy zmniejszają się (w przybliżeniu) 20-krotnie. Odpowiednio mniejsze są więc również wahania pomiarów prędkości.



Z powyższych rozważań na temat funkcjonowania algorytmów filtrujących wynika, iż pomiary prowadzone za pomocą odbiornika satelitarnego nie mogą stanowić podstawy określania poprawki logu; mogą pełnić tylko rolę pomocniczą, gdy podczas przejścia morzem pojawiają się wątpliwości dotyczące poprawności pracy logu. Określanie poprawki logu za pomocą tego systemu ma sens tylko w wariancie DGPS, bowiem w innym wypadku system satelitarny nie zapewnia dostatecznych dokładności. Ponadto pomiary takie mają sens tylko na prostych kursach, po uprzednim osiągnięciu właściwych parametrów ruchu przez okręt oraz ustabilizowaniu się algorytmu przetwarzania pomiarów w odbiorniku. Zazwyczaj czynności te zajmują około dziesięciu minut. Schematyczny wykres prędkości wyświetlanej przez odbiornik GPS w odniesieniu do rzeczywistej prędkości okrętu zmieniającej się według funkcji arcus tangens przedstawiono na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Przykład zmian prędkości wskazywanych przez odbiornik GPS

#### 4.6. Analiza czynników wpływających na dokładność pomiaru

Główną informacją, jaką pragniemy uzyskać w trakcie opisywanych pomiarów, jest dokładna wartość prędkości i poprawki logu (lub współczynnika korekcyjnego).

Dokładność określenia prędkości wynika z zasady obliczeń, czyli z zależności:

$$V = \frac{S}{t}, \quad (4.29)$$

W związku z tym błąd określenia prędkości można ocenić z zależności:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sigma_S^2}{t^2} + \frac{S^2}{t^4} \sigma_t^2}. \quad (4.30)$$

Jeżeli prędkość określana jest na kilku przebiegach i podlega uśrednianiu, to końcowy równy jest błędowi średniemu wartości średniej, a więc:

$$\sigma_V = \left(\frac{1}{n}\right) \sqrt{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_n^2}. \quad (4.31)$$

Założenie istnienia jednakowego błędu na poszczególnych przebiegach oznacza w przypadku dwóch przebiegów błąd równy  $\sigma_V = 0,7\sigma$ , a trzech (do obliczeń przyjmujemy drugi przebieg dwukrotnie) -  $\sigma_V = 0,5\sigma$ .

Dokładność określenia poprawki logu wynosi wówczas:

$$\sigma_{Li} = \pm 100 \sqrt{\left(\frac{1}{ROL}\right)^2 \sigma_S^2 + \left(\frac{S}{ROL^2}\right)^2 \sigma_{ROL}^2}, \quad (4.32)$$

gdzie:

$\sigma_S$  i  $\sigma_{ROL}$  - odpowiednio błędy średnie w dokładności określenia długości przebiegu i różnicy wskazań logu w milach morskich.

Jak wynika ze wzorów (4.29) i (4.32), na dokładność pomiarów głównie wpływają trzy czynniki – dokładności określenia następujących parametrów:

- długości przebiegu;
- różnicy wskazań logu;
- czasu trwania przebiegu.

Ponadto, niezależnie od powyższych, wpływ na dokładność ma też ilość przebiegów oraz powtórzeń odczytów na jednym przebiegu a także rzetelność osób przeprowadzających pomiary.

Średni błąd określenia długości przebiegu wynosi:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{P1}^2 + \sigma_{P2}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{Cp}^2}, \quad (4.33)$$

gdzie:

$\sigma_{P1}$  i  $\sigma_{P2}$  - średni błąd określenia początku i końca odcinka pomiarowego;

$\sigma_D$  - wydłużenie drogi spowodowane myśkowaniem okrętu;

$\sigma_{Cp}$  - wydłużenie drogi wywołane błędem systematycznym kompasu.

We wcześniejszych obliczeniach przyjęto, że ze względu na niewielkie odległości między pozycją  $P_1$  a pozycją  $P_2$  warunki określenia początku i końca linii przebiegu są takie same.

Błąd w określeniu długości przebiegu na mili pomiarowej między parami nabieżników zależy od ich czułości liniowej. Przy optymalnie dobranych wartościach odległości między stawami nabieżników i długości linii nabieżnika oraz średniej rozróżnialności oka ludzkiego  $\varepsilon \approx 1'$  można przyjąć, że błąd określenia dokładności długości przebiegu w tym przypadku jest pomijalnie mały.

Błąd w dokładności określenia pozycji początku i końca linii przebiegu, dokonanej za pomocą radaru czy nawigacyjnego systemu pozycyjnego, zależy od rodzaju zastosowanego systemu (został omówiony powyżej, włącznie

z uwzględnieniem wpływu skali mapy na tę wielkość). W przypadku konieczności określania długości odcinka pomiarowego na mapie należy stosować mapy nawigacyjne o jak największej skali. Jednak najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie takiego systemu nawigacyjnego, którego urządzenia odbiorcze umożliwiają określenie przebytej między dwoma obserwacjami drogi - bezpośrednio ze wskaźników, czyli wyposażone w urządzenia przeliczające.

W wielu przypadkach istotne błędy spowodowane różnicą zastosowanych układów odniesienia mapy i odbiornika nie oddziałują na dokładność określenia długości przebiegu, bowiem mają charakter systematyczny i wpływają identycznie na pozycję początku i końca odcinka pomiarowego.

Wydłużenie drogi na skutek myszkowania następujące zazwyczaj w przypadku sterowania według wskazań kompasu, zwłaszcza kompasu żyroskopowego, obliczyć można według zależności:

$$\frac{\Delta S}{S} = 0,005(\eta)^2, \quad (4.34)$$

gdzie

$\eta$  - maksymalny kąt zejścia sternika z kursu.

Fakt, że sternik utrzymuje okręt na kursie nie odchylając się bardziej niż o  $2^\circ$ , praktycznie nie ma wpływu na dokładność określenia długości przebiegu. Podobnie pomijalny jest wpływ stałego błędu kompasu, zwłaszcza niewłaściwego uwzględnienia całkowitej poprawki kompasu magnetycznego w przypadku sterowania według kompasu magnetycznego.

Przy kursie utrzymywanym wzdłuż linii pozycyjnej systemu hiperbolicznego (na jej prostoliniowym odcinku) odchylenie od kursu o  $3^\circ$  powoduje zwiększenie przebiegu do kilku metrów. Na odcinkach rzędu kilku mil



morskich, przy stanie morza do 2° Beauforta, jest możliwe nieprzekraczanie wymienionych parametrów.

Dokładność określenia różnicy wskazań logu jest zdeterminowana konstrukcją i dokładnością wskazań liczników przebytej drogi. Większość aktualnie stosowanych logów pokazuje przebytą drogę z dokładnością do 0,01 mili morskiej, a logi hydroakustyczne nawet do 0,001 mili. W tym przypadku graniczny błąd dokładności odczytu  $M_{OL} = \pm 0,005 \text{ Mm}$  (9,3 m), a przy pomiarze za pomocą logów hydroakustycznych wynosi 0,0005 mili (0,93 m). Warunki odczytu wskazań licznika przebytej drogi na początku i końcu linii przebiegu są praktycznie takie same. Można więc przyjąć, że  $\sigma_{ROL} = \sqrt{2} \cdot \sigma_{OL} = 13,1 \text{ m}$ . Taką wielkość przyjęto do wcześniejszych obliczeń. W przypadku logu hydroakustycznego wartość  $M_{ROL}$  wynosi 1,31 m.

Dokładność określenia czasu trwania przebiegu ma wpływ na dokładność określenia poprawki logu w przypadku wykonywania pomiarów sposobem zmierzonych prędkości. Przyjmuje się, że pomiar czasu trwania jednego przebiegu sekundomierzem jest obarczony błędem granicznym równym 1,5 s. W przypadku wykonywania większej ilości pomiarów podczas jednego przebiegu błąd ten maleje według zależności:

$$\sigma_{Tn} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{n}}, \quad (4.35)$$

gdzie:

$\sigma_T$  - błąd pomiaru czasu jednego przebiegu;

$n$  - ilość pomiarów.

Przy dwóch pomiarach czasu trwania przebiegu  $\sigma_{T2} = 1,06 \text{ s}$ , a przy trzech  $\sigma_{T3} = 0,86 \text{ s}$ . Aby zwiększyć dokładność mierzenia momentu rozpoczęcia i zakończenia przebiegu, można użyć trzech sekundomierzy, a odczytane

wskazania uśrednić. Jednak z powyższych danych można wnioskować, że nie ma to radykalnego wpływu na zwiększenie dokładności obliczeń.

Ilość przebiegów także oddziałuje na dokładność określenia poprawki logu - podobnie jak liczba pomiarów wykonywanych podczas jednego przebiegu. Zalecane jest wykonanie co najmniej dwóch przejść na przeciwnych kursach w celu uniknięcia wpływu wiatru na wykonywane pomiary. W przypadku stwierdzenia istnienia w rejonie prądu morskiego, należy zrealizować co najmniej trzy przebiegi. Gdy wykonywanych jest kilka ( $n$ ) pomiarów na jednym przebiegu, średni błąd określenia poprawki logu wynosi:

$$\sigma_L = \pm \left( \frac{100}{S \cdot n} \right) \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_{ROL}^2}, \quad (4.36)$$

gdzie

$\sigma_{Ln}$  - błąd średni określenia poprawki logu.

Przyjmując, że błędy powyższe są jednakowe podczas poszczególnych przebiegów, otrzymamy odpowiednio: w przypadku dwóch przebiegów  $0,71 \sigma$ , a trzech -  $0,61 \sigma$ .

Z powyższego wynika, że wykonując kilka przebiegów można zwiększyć dokładność określenia poprawki logu (także prędkości) lub dopuszczając wartość błędu zmniejszyć ich długość. Na przykład, kiedy określona długość przebiegu przy  $\sigma_{OL} = 1\%$ , wynosi 4 Mm, to wykonując dwa przebiegi można drogę każdego z nich skrócić do 2,85 mili, a trzy - do 2,45 mili morskiej.

Z przeprowadzonych badań i praktyki wynika, że podczas wykonywania kilkakrotnych pomiarów przy sprzyjających warunkach osiąga się około 0,5% błąd określenia poprawki logu.

Współczesne odbiorniki systemów radionawigacyjnych pozwalają nieco inaczej rozwiązać powyższy problem oraz uzyskać większe dokładności wskutek pominięcia prac graficznych. Szczególnie interesujący pod tym względem jest

system DGPS, lecz odpowiednio można korzystać z innych odbiorników wyposażonych w układy cyfrowe nazywane często komputerem nawigacyjnym. Zaletą takich odbiorników jest ich wyposażenie w opcję zliczania drogi przebytej pomiędzy punktem startowym i bieżącą pozycją obserwowaną. Dzięki temu na bieżąco jest dostępna informacja o przebytej drodze (względem dna) z dokładnością niewiele mniejszą od uzyskiwanej się na mili pomiarowej.

## BIBLIOGRAFIA

1. AVERBACH N.W.: Opredelenie skorosti sudna i poprawki łaga. Transport. Moskwa 1988.
2. BAGIROV M. S., FAJN G. I.: Osnovy sudovożdenia. Agropromizdat. Moskwa 1985.
3. KRAJCZYŃSKI E.: Logi morskie. Wydawnictwo Morskie. Gdańsk 1980.
4. LESKOV M. M. i in.: Navigacja. Transport. Moskwa 1986.
5. PĄCZEK S.: Analiza metod określania poprawek logów morskich. (Praca magisterska.) AMW. Gdynia 1998.
6. SIRIAEV E. D. i in.: Spravočnik kapitana promyslovogo sudna. Agropromizdat. Moskwa 1990.
7. URBĄŃSKI J., KOPACZ Z., POŚIŁA J.: Nawigacja morska . AMW. Gdynia 1995.



## **Załącznik**

# **WYMAGANIA TECHNICZNE I KONSTRUKCYJNE DLA LOGÓW OKRĘTOWYCH**

Minimum wymagań technicznych w stosunku do logów sprecyzowane jest przez Międzynarodową Organizację Morską w odpowiednich rezolucjach. Okręt (statek) może być wyposażony w doskonalszy sprzęt lub większą jego ilość niż podano w tych uchwałach. Ich treść bywa adaptowana przez instytucje krajowe i towarzystwa klasyfikacyjne, a dokumenty w ten sposób utworzone pełnią rolę przepisów obowiązujących w państwie. Zwykle nie dotyczą one okrętów wojennych, stanowią jednak doskonały punkt odniesienia w tej dziedzinie.

Zasadnicze wymogi Międzynarodowej Organizacji Morskiej w stosunku do logów okrętowych zaprezentowano poniżej.

1. Informacja o prędkości statku może być przedstawiona w formie analogowej lub cyfrowej. Przy zobrazowaniu cyfrowym przyrost stopni nie powinien przekraczać 0,1 węzła; przy analogowym - jednostki powinny być wyskalowane co najmniej co 0,5 węzła, a co 5 węzłów musi znajdować się znacznik cyfrowy. W przypadku możliwości przedstawienia prędkości okrętu w kierunkach do przodu i wstecz, aktualny kierunek ruchu powinien być wyraźnie wskazany.
2. Należy zapewnić dostarczanie informacji o przebytej drodze okrętu do innych urządzeń nawigacyjnych na okręcie. Powinna być ona w formie jednostkowego zamknięcia lub równoważnika dla każdej 0,005 mili morskiej przebytej drogi.

Treść rezolucji A.478(XII) zawierającej powyższe wymagania jest obowiązująca w przypadku logów instalowanych na statkach do końca 1996 roku. Natomiast logi montowane po tym okresie powinny odpowiadać

wymaganiom zawartym w rezolucji A.824 (19). Uchwała ta wprowadza dodatkowe wymogi:

- jeżeli stosowane jest cyfrowe, szeregowe złącze (interfejs), informacja o parametrach prędkości i przebytej drogi łącznie z kursem powinna mieć formę szeregowego strumienia informacji cyfrowej, zgodnie z wymaganiami międzynarodowego protokołu o cyfrowych interfejsach dla wyposażenia morskiego;
- jeżeli log zapewnia pomiar prędkości innej niż wzdłuż osi symetrii statku, wówczas składowa wzdłużna i poprzeczna prędkości powinna być określana w stosunku do wody, a pomiar tych składowych względem dna może następować jako opcja dodatkowa; informacja o wypadkowej prędkości i kursie ma zapewniać możliwość jej wyłączenia.

Wymagania Polskiego Rejestru Statków zebrane są w dokumencie pod tytułem „Pozaklasyfikacyjne przepisy wyposażenia statków morskich”, w którym określono wymagania eksploatacyjno - techniczne dotyczące przyrządów i urządzeń nawigacyjnych (w tym i logów). Ostatnia edycja przepisów nastąpiła w 1990 roku, a ich treść dotyczy statków, których wyposażenie jest pod nadzorem technicznym PRS oraz urządzeń przeznaczonych dla tych statków.

Poniżej zostaną zaprezentowane ważniejsze wymagania.

1. Logi śrubowe, ciśnieniowe i indukcyjne powinny zapewniać określenie prędkości statku i przebytej drogi - odpowiednio w stosunku do wody i dna, w dowolnym czasie i każdych warunkach atmosferycznych.
2. Log powinien umożliwiać pomiar składowej wzdłużnej prędkości statku w granicach od -5 do 30 węzłów tam gdzie jest to zapewnione oraz pomiar składowej poprzecznej w granicach od 0 do 8 węzłów w każdą stronę. Wymaganie pomiaru prędkości ruchu wstecznie obowiązuje wobec logów określających prędkość w stosunku do wody.
3. Czułość początkowa logu powinna być nie większa od 0,1 węzła.

4. Błąd pomiaru prędkości nie powinien przekraczać 5% mierzonej wielkości lub 0,5 węzła (zależnie od tego, która z tych wartości jest większa) pod warunkiem braku wpływu pływów, wiatru, prądu i przypływu.
5. Błąd pomiaru przebytej drogi nie powinien przekraczać 5% drogi przebytej przez statek w ciągu jednej godziny lub 0,5 mili w każdej godzinie (zależnie od tego, która z tych wartości jest większa) pod warunkiem braku wpływu czynników wymienionych poprzednio.
6. Różnica między wskazaniami powtarzaczy prędkości a wskazaniami przyrządu głównego nie powinna przekraczać  $\pm 1,5\%$  górnej granicy zakresu pomiarowego logu. Różnica między wskazaniami powtarzaczy przebytej drogi a wskazaniami przyrządu głównego nie powinna przekraczać  $\pm 0,01$  mili, a różnica między wskazaniami powtarzaczy  $\pm 0,02$  mili. Powtarzacze prędkości i przebytej drogi muszą pracować jednocześnie.

Powtarzacze prędkości powinny być skonstruowane jako całkowicie samosynchronizujące się. Dopuszczane jest stosowanie wskaźników cyfrowych jako powtarzaczy prędkości, przy czym powinien być wyraźnie określony kierunek ruchu statku.

Logi powinny odpowiadać ponadto określonym wymaganiom konstrukcyjnym. Oto niektóre z nich:

- w zestawach logów należy przewidzieć niezbędną liczbę wskaźników prędkości i liczników przebytej drogi; można stosować wspólne przyrządy zawierające w jednej obudowie licznik przebytej drogi i wskaźnik prędkości;
- logi powinny być wyposażone w urządzenia do ich odpowiedniej regulacji po zainstalowaniu na statku i do usuwania niedopuszczalnych błędów w ich wskazaniach;
- licznik przebytej drogi powinien umożliwiać odczyt dziesiątych części mili, mil, dziesiątków, setek i tysięcy mil; należy przewidzieć zainstalowanie urządzenia do ustawiania licznika na pozycji zero oraz

w konstrukcji logów - do sygnalizacji informującej o określonej zadanej drodze przebytej przez statek:

- dokładność odczytu prędkości według wskazań przyrządu głównego i powtarzaczy nie powinna być mniejsza niż 0,1 węzła;
- log powinien umożliwiać automatyczne przekazywanie danych o składowych prędkości wzdłużnej i poprzecznej, niezbędnych do zapewnienia działania innych urządzeń wyposażenia nawigacyjnego i całego zautomatyzowanego systemu nawigacyjnego;
- log przystosowany do pomiaru prędkości statku względem dna i wody powinien być wyposażony we wskaźnik rodzaju pracy;
- przetworniki akustyczne logów nie powinny powodować zakłóceń pracy innych elektro- i radionawigacyjnych urządzeń na statku.

„Pozaklasyfikacyjne przepisy wyposażenia statków morskich” zobowiązują również użytkowników logów do wykonywania corocznych przeglądów, a raz na cztery lata - próby działania mechanizmów w morzu w celu stwierdzenia ich zgodności z wymaganiami dotyczącymi stanu technicznego.







**AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ**  
**ISBN 83-87280-22-4**