

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Maciej Gućma

**Analiza możliwości zastosowania kompasu elektronicznego
w pilotowym systemie nawigacyjnym**

Słowa kluczowe: kompasy elektroniczne, nawigacja, akwen ograniczony

Proces manewrowania statkiem na akwenach ograniczonych wymaga od załogi statku skorzystania z usług eksperta, jakim jest pilot (ekspert znający parametry hydro-meteorologiczne i batymetryczne danego akwenu manewrowego). Aby zminimalizować wpływ wskazań urządzeń statkowych na decyzje pilota, proponuje się wprowadzenie systemu pilotowego (PNS).

Jednym z elementów takiego systemu jest kompas elektroniczny. W artykule określono wymagania stawiane kompasowi elektronicznemu w PNS oraz zaprezentowano wybrane technologie budowy kompasów elektronicznych. Przedstawiono również wyniki oceny dokładności kompasu elektronicznego wykonanego w technologii AMR (anizotropowa magneto-rezystancja).

**Possible Applications of the Electronic Compass
in a Pilot Navigational System**

Key words: electronic compass, navigation, restricted area

Vessel maneuvering in restricted areas requires expert knowledge (usually that of a pilot who is a specialist in a given area). To minimize the influence of shipboard equipment on pilot decisions, it is proposed to create a pilot navigational system (PNS).

One of the PNS components is an electronic compass. The article looks into selected compass technologies. The accuracy of AMR (anisotropy magnetoresistive technology) electronic compass has been assessed.

Wstęć

Badanie i opis zachowania układu statek – nawigator – środowisko zewnętrzne, pozwala na budowę systemów wspomaganie podejmowania decyzji, takich np. jak system pilotowy. Systemy takie przyczyniają się do wzrostu poziomu bezpieczeństwa manewrowania statkiem na akwenach ograniczonych. Ich zadaniem jest dostarczenie niezbędnych informacji pilotowi prowadzącemu statek. Jedną z nich jest informacja o kursie jednostki. Najefektywniejszą, a jednocześnie najbardziej ekonomicznie uzasadnioną metodą pozyskiwania danych o kursie jest sensor ziemskiego pola magnetycznego. Sensory są stosowane z powodzeniem od lat 30. ubiegłego wieku. Pierwsze rozwiązania były oparte na pomiarze zmiany pola magnetycznego, ferromagnetycznego rdzenia umieszczonego w zewnętrznym polu kluczującym (technologia Fluxgate). Czułość tych czujników, dla typowych zastosowań komercyjnych, wynosi ok. 10 μG . Inną, stosunkowo od niedawna (lata 80. zeszłego stulecia) wykorzystywaną technologią do budowy kompasów jest anizotropowa rezystancja magnetyczna (AMR).

1. Wymagania stawiane kompasom elektronicznym

Wymagania, jakie muszą być spełnione przez urządzenie do wskazań kierunku w pilotowym systemie nawigacyjnym można podzielić na 3 grupy:

- 1) wymagania co do dokładności wskazań,
- 2) wymagania odnośnie prędkości transmisji i częstotliwości powtarzania pomiaru,
- 3) inne wymagania.

Wymagania odnośnie dokładności wskazań kierunku są następujące:

- dokładność wskazania kursu rzeczywistego $D_t \leq 1^\circ$;
- rozdzielczość wskazań kursu $R_t \leq 0,5^\circ$;
- maksymalny kąt przechyłu urządzenia $\pm 40^\circ$ (parametr związany z dokładnością wskazania kursu);
- dokładność wskazania kąta przechyłu nie gorzej niż $0,5^\circ$;
- zakres wskazań kąta inklinacji $\pm 60^\circ$;
- zdolność kompensacji wpływu stali twardej ± 1 gauss.

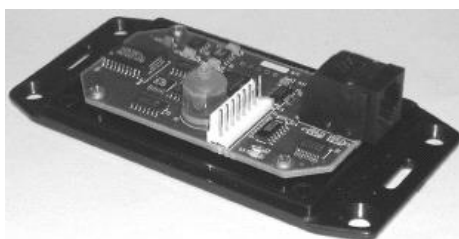
Wymagania odnośnie prędkości transmisji i częstotliwości powtarzania pomiaru to:

- prędkość transmisji wskazań ≥ 19200 bps;
- częstotliwość odświeżania pomiaru na mapie $\geq 10/\text{s}$.

Inne wymagania:

- czas instalacji i kalibracji urządzenia maksymalnie 5 min,
- napięcie zasilania 5 – 25 V,
- pobierany prąd: 20 mA w trybie pracy,
- temperatura pracy: $-20^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$,
- kompensacja wpływu temperatury na dokładność odczytu kursu.

Wymagania te są podyktowane założeniami stawianymi systemom PNS, a w szczególności: ich przenośności, autonomiczności działania, dokładności wskazań oraz skalowalności. Kierując się tymi wymaganiami dobrano odpowiedni układ trójosiowego kompasu magnetycznego, opartego na technologii AMR – True North Revolution Comapss. Układ przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Kompas typu True North Revolution
Fig. 1. True North Revolution compass

Kompas ten charakteryzuje się korzystnym stosunkiem ceny do dokładności wskazań, gdzie kompas typu Fluxgate o podobnej precyzji kosztują około 1,5 razy więcej. Proces produkcji tych sensorów pozwala na dużo większą miniaturyzację niż sensorów typu Fluxgate, przy stałym stosunku czułości do ceny [3]. Parametry pracy układu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry pracy układu kompasu AMR firmy True North Revolution [5]
Parameters of TNT Revolution AMR compass [5]

Parametr	Wartość	Uwagi
1	2	3
dokładność wskazań kursu	$\pm 0,5^{\circ}$	(na poz. ufności 0,95), przechył $< 35^{\circ}$ inklinacja $< 60^{\circ}$
rozdzielczość	$\pm 0,2^{\circ}$	
kąt przechyłu urządzenia	$\pm 40^{\circ}$	wartość maksymalna
dokładność wskazań kąta przechyłu	$\pm 0,2^{\circ}$	

Tabela 1, cd.

1	2	3
zakres wskazań kąta inklinacji	$\pm 80^\circ$	
czas odpowiedzi sensora	75 ms	wartość średnia
częstotliwość odświeżania	1200/min	wartość maksymalna
prędkość transmisji	19200 bps	wartość maksymalna
napięcie zasilania	5 – 25 V	
pobierany prąd	15 mA	wartość średnia
temperatura pracy	$-20^\circ\text{C} \div 50^\circ\text{C}$	

Kompas komunikuje się z komputerem za pomocą interfejsu szeregowego RS232, a producent dostarcza oprogramowanie dla systemu Windows i PalmOS umożliwiające:

- wyświetlanie kursu oraz przechyłu,
- wyświetlanie i przechwytywanie sentencji NMEA,
- zmianę parametrów pracy kompasu,
- kalibrowanie kompasu,
- kompensację zarówno dla stali miękkiej, jak i twardej,
- wyznaczanie tabeli dewiacji,
- transferowanie danych pomiędzy Windows jak i PalmOS.

Oprogramowanie PalmOS pracuje na komputerach przenośnych z rodziny Palm m i nadaje się do pomiarów i rejestracji wyników w terenie. Wygląd interfejsu pokazano na rysunku 2.



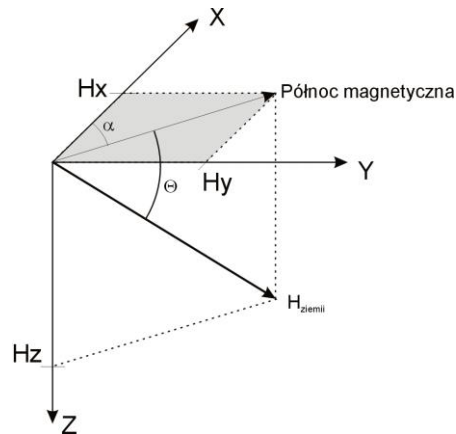
Rys. 2. Interfejs systemu rejestracji danych z kompasu TNT
Fig. 2. User interface for TNT compass

2. Kompensacja i kalibracja kompasu

Natężenie ziemskiego pola magnetycznego osiąga wartość ok. 0,5 – 0,6 G, a jego wektor jest w przybliżeniu równoległy do powierzchni ziemi. Fakt ten wykorzystują kompasy tradycyjne oraz kompasy elektroniczne.

Pomiar kursu w kompasie elektronicznym odbywa się z użyciem sensorów trójosiowych, gdzie tylko dwie składowe poziome biorą udział w określaniu wartości kursu (dla nie przechylonego statku), natomiast składowa pionowa służy do wyznaczania kursu w przypadku przechylonego statku i do kalibracji urządzenia.

Graficzne przedstawienia wartości natężenia H składowych poziomych X, Y i pionowej Z , ziemskiego pola magnetycznego, kąt inklinacji Θ oraz kursu magnetycznego α zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Składowe ziemskiego pola magnetycznego
Fig. 3. Components of the Earth magnetic field

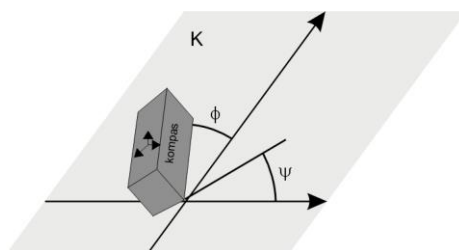
W przypadku, gdy statek nie jest przechylony, kurs magnetyczny można obliczyć następująco [3]:

$$\alpha = \text{arcTan} (H_y/H_x)$$

Natomiast w przypadku przechyłu względem płaszczyzny K o kąty ϕ, ψ , co przedstawiono na rysunku 4, należy dodatkowo uwzględnić te kąty w wyliczaniu składowych H_x, H_y [3]:

$$H_x = X \cdot \cos \phi + Y \cdot \sin \psi \cdot \sin \phi - Z \cdot \cos \psi \sin \phi$$

$$H_y = Y \cdot \cos \psi + Z \cdot \sin \psi$$



Rys. 4. Przechył sensora wg płaszczyzny K
 Fig. 4. A tilt of the sensor in relation to the plane K

Gdy pożądana wartość dokładności kursu jest $\leq 1^\circ$, układ sensorów musi mieć możliwość pomiaru z dokładnością $\leq 0,1^\circ$. Powinien charakteryzować się dużą liniowością oraz posiadać małą histerezę. Wpływ na dokładność mają [3]:

- rozdzielczość pracy przetwornika A/D (analog/digital),
- błędy sensora magnetycznego,
- zmiany temperatury,
- lokalne anomalie magnetyczne,
- błąd wskazań przechyłomierza,
- niedokładność uwzględnienia deklinacji.

Źródła zakłóceń dla urządzenia TNT Revolution można podzielić na zakłócenia powstałe w wyniku obecności stali magnetycznej twardej i miękkiej. Pominięto wpływ temperatury oraz zmiany deklinacji. Pozostałe zakłócenia są kompensowane automatycznie.

Proces kompensacji i kalibracji kompasu podzielono na następujące grupy:

- ustalenie właściwego wzmocnienia na wyjściu wzmacniacza sensora,
- pomiar pola magnetycznego względem składowej pionowej,
- obrót obiektu (statku, pojazdu) z zamocowanym na stałe sensorem, w celu pomiaru składowych aktualnych pola,
- uwzględnienie zmian pola aktualnego do tabeli dewiacji.

Właściwy dobór wzmocnienia na wyjściu układu umożliwia dopasowanie parametrów pracy do panujących warunków. Mniejsze wzmocnienie pozwala na dokładniejsze skompensowanie wpływu stali twardej, natomiast większe na zwiększoną czułość sensora. W przypadku systemów PNS, podobnie jak i innych aplikacji sensorów AMR (samolot, helikopter), bardziej właściwe jest mniejsze wzmocnienie na wyjściu [3, 4].

Pomiar pola magnetycznego względem składowej pionowej sensora (Z) należy przeprowadzać z dala od zakłóceń elektromagnetycznych. Otrzymana wiel-

kość jest uśredniana dla kilkuset pomiarów i pozwala na uwzględnienie kąta inklinacji. Obrót obiektu może odbywać się w trybie ciągłym (obróć ze stałą prędkością kątową), lub pomiar zatrzymany (minimum 8 pomiarów każdy przesunięty o ok. 45°). Pomiarzy te są uwzględniane przez procesor do kalibracji urządzenia oraz do sporządzenia tabeli dewiacji.

Eksperyment pomiaru pola magnetycznego w ruchu przeprowadzono dla dwóch pojazdów, jednego wykonanego całkowicie z materiału amagnetycznego (żywice syntetyczne i tworzywa sztuczne) oraz zwykłego samochodu osobowego.

Pierwszym etapem było zbadanie wpływu pola samochodu, w ruchu po okręgu, na nie skalibrowany i nie skompensowany układ kompasu oraz porównanie tego z wynikami uzyskanymi z pojazdu amagnetycznego. Następnie wykonano kalibrację i kompensację kompasu oraz ponowną rejestrację wartości składowych pola magnetycznego dla samochodu. Pomiarzy dla samochodu wykonywano z uwzględnieniem tych samych warunków, a więc przy włączonym silniku z zachowaniem centryczności montażu kompasu. Układ zamontowano w samochodzie w pobliżu geometrycznego środka ciężkości wzdłuż osi symetrii, co przedstawiono na rysunku 5.

Drugim etapem był pomiar w ruchu po prostej na odcinku 100 m. Porównano wyniki pomiaru kursu ze skompensowanego kompasu dla pojazdu amagnetycznego i samochodu.

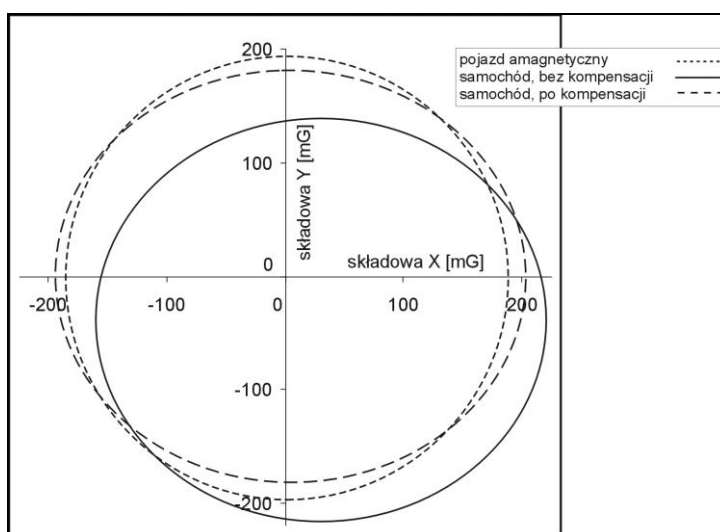


Rys. 5. Montaż kompasu w samochodzie
Fig. 5. Compass mounted in a road vehicle

Trzecim etapem było dziesięciokrotne przeprowadzanie kalibracji i kompensacji kompasu dla samochodu, rejestrując czas tej procedury.

3. Wyniki eksperymentu

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów określono krzywe obrazujące przebiegi na wyjściach sensorów X i Y w miligaussach. Zaprezentowano to na rysunku 6.



Rys. 6. Przebiegi na wyjściach sensorów X i Y
Fig. 6. Output values for X,Y sensors

Analiza wyników badań dla etapu pierwszego pokazała:

1. W przypadku pełnego obrotu (360°) pojazdu nie posiadającego metalowych części na wyjściu sensorów X i Y uzyskano prawie idealny okrąg.
2. Pełen obrót dla samochodu z nie skompensowanym kompasem wyraźnie pokazuje wpływ pola magnetycznego samochodu na odczyt kursu.
3. Po przeprowadzonej kompensacji uzyskano znacznie lepsze wyniki wskazań kursu.

Drugi etap obejmował pomiary kierunku ruchu po prostej. Średnie oraz odchylenia standardowe pomiaru kursu w ruchu po prostej w obie strony (kursy magnetyczne ok. 245° i 115°) dla kompasu skalibrowanego, dla pojazdu amagnetycznego i samochodu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Zestawienie średnich i odchyleń standardowych pomiarów kursu
Mean Values and standard deviations for the course determination

Parametr	Pojazd amagnetyczny		Samochód	
	średnia pomiaru kursu [°]	245,01	115,06	245,15
odchylenie standardowe [°]	0,2185	0,2008	0,5553	0,6876

Średnie czasy montażu kompasu w samochodzie, jego kalibracji i kompensacji w zależności od stosowanej procedury (pomiar ciągły – pełny obrót, pomiar zatrzymany – 8 pomiarów) przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Średnie wartości pomiaru czasu montażu kompasu w samochodzie
Mean values of the compass installation time

Procedura	Pomiar ciągły – pełny obrót	Pomiar zatrzymany 7 pomiarów
średnia wartość [min]	13,32	16,92

Wnioski

1. Dokładność wyznaczania kursu dla skalibrowanego kompasu w samochodzie jest porównywalna z dokładnością określoną przez producenta.
2. Wymagania dotyczące dokładności wskazań kursu postawione kompasowi elektronicznemu przez pilotowy system nawigacyjny w przypadku pomiarów w samochodzie zostały spełnione. Konieczne jest jednak przeprowadzanie badań dokładności na statku, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu okrętowego pola magnetycznego na wskazania kompasu.
3. Wymagania odnośnie prędkości transmisji i częstotliwości powtarzania dla kompasu TNT Revolution są spełnione (tab. 1).
4. Średni czas instalacji i kalibracji w samochodzie prawie trzykrotnie przekracza czas dopuszczony dla instalacji. Czas instalacji i kalibracji na statku, ze względu na inną dynamikę obiektu, ulegnie wydłużeniu. Dodatkowo na statku nie ma możliwości wykonania pomiaru zatrzymanego.
5. Dalsze badania w tej dziedzinie powinny uwzględnić zmiany w oprogramowaniu, pozwalające na inne metody kalibracji możliwe do zastosowania na statku, jak np.: wprowadzenie zewnętrznej informacji o kursie (z żyrokompasu okrętowego).

Literatura

1. Ripka P., *New directions in fluxgate sensors*, Czech Technical University, Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurement, 1999, www.feld.cvut.cz.
2. Gućma M., *Model systemu pilotowego wspomagania nawigacyjnego na akwenach ograniczonych*, praca dyplomowa magisterska, WSM Szczecin, 2003.
3. Caruso M.J., *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*, Honeywell Inc. 1997, SAE SP-1220, (Feb. 1997) 15-21.
4. Lund C.A., *Compasses in Small Craft*, Glasgow, Scotland: Brown, Son & Ferguson, Ltd., 1983, 39-62.
5. *True North Revolution Compass*, informacje z witryny: www.tntc.com, 2004.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr inż. kpt.ż.w. Zbigniew Burciu, prof. AM
prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Eugeniusz Łusznikow, prof. AM

Adres Autora

mgr inż. Maciej Gućma
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin