

TECHNICAL SCIENCES

Мінімізація залишкової швидкісної похибки гірокомпасу з автономним управлінням чутливого елемента

М. С. Алексейчук, П. О. Чапчай, В. В. Степаненко

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна
Corresponding author. E-mail: burmaka1964@gmail.com

Paper received 28.04.21; Accepted for publication 16.05.21.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2021-255IX32-05>

Анотація. В роботі отримано аналітичний вираз для розрахунку максимального значення некомпенсованої швидкісної похибки гірокомпасу. Розраховано значення некомпенсованої швидкісної похибки гірокомпасу в залежності від різниці між поточною і введеною в коректор широтами, які представлено в табличному вигляді. Представлено графічні залежності різниці між поточною і введеною в коректор широтами від поточної широти для швидкості судна від 15 до 30 вузлів з метою визначення діапазонів широт, в яких коректор не потребує оновлення широти.

Ключові слова: точність судноводіння, гірокомпас, компенсація швидкісної похибки, залишкова швидкісна похибка.

Вступ. Навігаційна безпека судноводіння в значній мірі залежить від похибок навігаційних вимірювань, а також від експлуатаційної надійності датчиків навігаційної інформації.

На навігаційну безпеку впливають характеристики точності визначення курсу. Так як в якості базового приладу, що визначає курс судна, використовується гіроскопічний компас, то до величин його похибок наголошуються вимоги, які забезпечують необхідну точність визначення азимутальних напрямків. В разі руху судна по сферичній поверхні Землі виникають додаткові кутові швидкості, які являються причиною виникнення швидкісної похибки. Її компенсація передбачена відповідним коректором, в який необхідно вводити параметри руху судна і його широту. Несвоєчасне введення широти судна в коректор веде до появи залишкової некомпенсованої швидкісної похибки, що погіршує точність гірокомпасу.

Тому розробка способу мінімізації залишкової швидкісної похибки гірокомпасу, чому присвячена дана стаття, являється актуальним і перспективним напрямком.

Короткий огляд публікацій по темі. В роботі [1] приведено інформацію про класичні і сучасні компаси іноземних фірм, розглянуто особливості їх конструкції та методичні похибки, принцип роботи і конструкція оптико-волоконних і супутникових компасів.

Похибки технічних засобів судноводіння, що виникають в різних умовах експлуатації, і їх вплив на безпеку мореплавання досліджені в роботі [2]. Теорія і практика морських навігаційних приладів викладена в роботі [3], детально розглянуто похибки приладів і методи їх компенсації.

Сучасним морським системам визначення курсу присвячена робота [4], показано, що вони можуть бути позиційними та аналітичними. Особливу увагу приділено принципам роботи аналітичним без платформним оптико-волоконним та супутниковим компасам. Детальні відомості відносно конструкції морської навігаційної техніки закордонного виробництва представлені в роботі [5], а в роботі [6] розглянуто інтегровані системи ходового містку, які в своєму складі містять навігаційні прилади, що використовую-

ються в якості датчиків навігаційної інформації.

Мета. Метою даної публікації являється розробка процедури мінімізації залишкової швидкісної похибки гірокомпасу з автономним управлінням чутливого елемента.

Матеріали і методи. Сучасним гірокомпасам з автономним управлінням чутливого елемента притаманні методичні похибки, до яких відносяться швидкісна, інерційна похибки та похибка від хитавиці судна. Зниження похибки від хитавиці судна досягається конструктивними мірами: до складу чутливого елемента входять два гіроскопи, які забезпечують його горизонтальну стабілізацію, завдяки чому похибка від хитавиці судна знижується до незначних розмірів і нею можна знехтувати. Для більшості гірокомпасів даного типу існують рекомендації судноводіям для врахування інерційної похибки, яка виникає через маневрування судна.

Для компенсації швидкісної похибки δ_v використовується відповідний коректор, який розраховує її величину за формулою [1]:

$$\delta_v = -\frac{V \cos GKK}{900 \cos \varphi_t},$$

де V - швидкість судна;

GKK - гірокомпасний курс судна;

φ_t - поточне значення широти плавання.

Розраховане значення швидкісної похибки δ_v коректором виключається із показань гірокомпасу.

Компенсація швидкісної похибки гірокомпасу потребує введення широти в коректор, яке може здійснюватися дискретно при зміні широти плавання судна на деяку величину. При цьому виникає питання про допустиму різницю між введеним і дійсним значеннями широти, чим визначається періодичність введення широти плавання судна в коректор.

Розглянемо це питання більш детально.

Результати і їх обговорення. Припустимо, поточне значення широти плавання судна становить φ_t , а в коректор введена широта φ_v . В цьому випадку дійсне

значення швидкісної похибки δ_{vt} визначається виразом:

$$\delta_{vt} = -\frac{V \cos \Gamma KK}{900 \cos \varphi_t},$$

а коректор виключатиме швидкісну похибку δ_{vy} , величина якої визначається формулою: $\delta_{vy} = -\frac{V \cos \Gamma KK}{900 \cos \varphi_y}$.

Якщо поточне φ_t і введене φ_y значення широти не співпадають, то виникає некомпенсована похибка $\Delta\delta_v$ рівна різниці швидкісних похибок δ_{vt} і δ_{vy} , тобто: $\Delta\delta_v = \delta_{vt} - \delta_{vy}$,

або з урахуванням одержаних формул для δ_{vt} і δ_{vy} одержимо наступний вираз:

$$\Delta\delta_v = -\frac{V \cos \Gamma KK}{900} \left(\frac{1}{\cos \varphi_t} - \frac{1}{\cos \varphi_y} \right) = 57,3^\circ q \left[\frac{1}{\cos \varphi_t} - \frac{1}{\cos(\varphi_t + \Delta\varphi)} \right], \quad (1)$$

де $q = -\frac{V \cos \Gamma KK}{900}$, $\Delta\varphi$ - різниця між поточною φ_t і введеною в коректор φ_y широтою.

Максимальне значення некомпенсованої похибки $\Delta\delta_{vm}$ досягається на $\Gamma KK=0$, з урахуванням цього запишемо формулу (1) у вигляді:

$$\Delta\delta_{vm} = q^* \left[\frac{1}{\cos \varphi_t} - \frac{1}{\cos(\varphi_t + \Delta\varphi)} \right], \quad (2)$$

$$\text{де } q^* = -\frac{57,3V}{900}.$$

Аналіз формули (2) показує, що залишкова похибка $\Delta\delta_{vm}$ є функцією аргументів V , φ_t і $\Delta\varphi$.

Розглянемо залежність $\Delta\delta_{vm}$ від φ_t і $\Delta\varphi$ при фіксованому значенні V , наприклад 20 вузлів. В цьому випадку $q^* = -1,273^\circ$, тому формулу (2) можна записати в наступному вигляді:

$$\Delta\delta_{vm} = -1,273 \left[\frac{\cos(\varphi_t + \Delta\varphi) - \cos \varphi_t}{\cos \varphi_t \cos(\varphi_t + \Delta\varphi)} \right]. \quad (3)$$

Приймаючи значення $\Delta\varphi \in (-15, 15)$ через 5° , для широт φ_t із значеннями $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ і 70° по формулі (3) розраховували залежність $\Delta\delta_{vm} = f(\varphi_t, \Delta\varphi)$.

Результати розрахунків для широт, рівних 0° і 15° приведені на рис. 1, а в табл. 1 приведено значення залишкової похибки $\Delta\delta_{vm}$ для зазначених широт від 0° до 70° .

Таблиця 1. Значення $\Delta\delta_{vm}$ для широт від 0° до 70°

$\Delta\varphi^\circ$	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15
$\Delta\delta_0$	0,045	0,028	0,016	0,07	0,02	0	0,02	0,07	0,016	0,028	0,05
$\Delta\delta_{15}$	0,045	0,043	0,038	0,03	0,016	0	0,021	0,05	0,076	0,111	0,15
$\Delta\delta_{30}$	0,15	0,13	0,11	0,08	0,04	0	0,05	0,1	0,17	0,24	0,33
$\Delta\delta_{45}$	0,33	0,28	0,23	0,16	0,09	0	0,10	0,22	0,37	0,54	0,75
$\Delta\delta_{60}$	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0	0,4	0,7	1,2	1,5	2,3
$\Delta\delta_{70}$	1,5	1,3	1,1	0,8	0,5	0	0,9	1,9	3,6	6,7	10,9

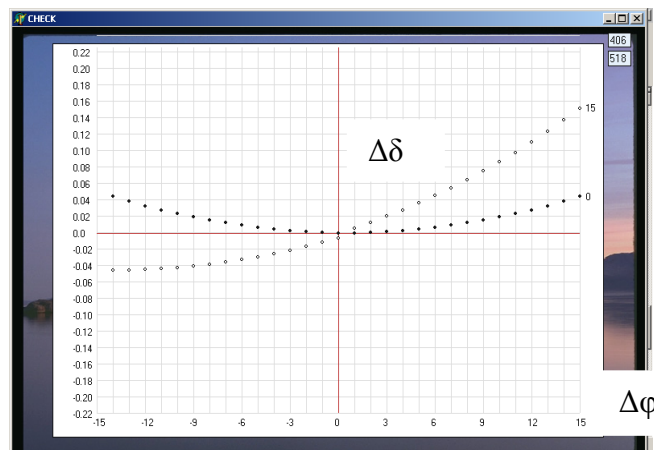


Рис. 1. Залежність $\Delta\delta_{vm} = f(\varphi_t, \Delta\varphi)$ для широт 0° і 15°

Похибка від неточності введення широти в коректор $\Delta\delta_{vm}$ повинна мати значення, яке не перевершує $0^\circ,3$ ($0^\circ,2$ при передачі курсу на репітери і $0^\circ,1$ при пеленгуванні орієнтиру). Аналізуючи результати розрахунків, можна зробити висновок, що при широтах, що не перевершують 30° , похибка $\Delta\delta_{vm} \leq 0^\circ,3$ при введенні широти $\Delta\varphi \leq 15^\circ$. При $\varphi_t=45^\circ$ значення $\Delta\delta_{vm} \leq 0^\circ,3$, якщо $\Delta\varphi \leq 9^\circ$, у випадку $\varphi_t=60^\circ$ величина $\Delta\delta_{vm} \leq 0^\circ,3$ при $\Delta\varphi \leq 3^\circ$ і для широти $\varphi_t=70^\circ$ похибка $\Delta\delta_{vm} \leq 0^\circ,3$ при $\Delta\varphi \leq 1^\circ$.

Таким чином, при швидкості судна до 20 вузлів в діапазоні широт $0-30^\circ$ введення широти в коректор проводиться, коли $\Delta\varphi = 15^\circ$, в діапазоні широт $30-45^\circ$ $\Delta\varphi = 9^\circ$, в діапазоні широт $45-60^\circ$ $\Delta\varphi = 3^\circ$ і в діапазоні широт $60-70^\circ$ $\Delta\varphi = 1^\circ$ неточності введення широти в коректор $\Delta\delta_{vm}$ не перевершує $0^\circ,3$. Для цього скористаємося формулою (2), з якої виходить:

$$\frac{\Delta\delta_{vm}}{q^*} = \frac{1}{\cos \varphi_t} - \frac{1}{\cos(\varphi_t + \Delta\varphi)}.$$

Покажемо можливість вибору значення $\Delta\varphi$ для будь-якої широти за умови, що похибку від

Знайдемо з даної формули вираз для величини $\Delta\varphi$, враховуючи, що:

$$\frac{1}{\cos(\varphi_t + \Delta\varphi)} = \frac{1}{\cos \varphi_t} - \frac{\Delta\delta_{vm}}{q^*} = \frac{q^* - \Delta\delta_{vm} \cos \varphi_t}{q^* \cos \varphi_t}.$$

З останнього виразу виходить:

$$\cos(\varphi_t + \Delta\varphi) = \frac{q^* \cos \varphi_t}{q^* - \Delta\delta_{vm} \cos \varphi_t}.$$

Отже, справедлива рівність:

$$\varphi_t + \Delta\varphi = \text{Arccos}\left(\frac{q^* \cos \varphi_t}{q^* - \Delta\delta_{vm} \cos \varphi_t}\right),$$

або одержуємо рівняння для розрахунку $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \text{Arccos}\left(\frac{q^* \cos \varphi_t}{q^* - \Delta\delta_{vm} \cos \varphi_t}\right) - \varphi_t.$$

Оскільки $\Delta\delta_{vm} = 0^\circ,3$, то остаточно одержимо:

$$\Delta\varphi = \text{Arccos}\left(\frac{q^* \cos \varphi_t}{q^* - 0^\circ,3 \cos \varphi_t}\right) - \varphi_t.$$

За допомогою даного виразу проводився розрахунок залежності $\Delta\varphi$ від φ_t для різних значень швидкості судна: 15, 20, 25 і 30 вузлів. На рис. 2 показана залежність допустимої різниці широт $\Delta\varphi$ від поточної широти для швидкості судна 30 вузлів. Для інших швидкостей судна залежність $\Delta\varphi$ від φ_t показана на рис. 3 – рис. 5.

Аналіз рис. 2 показує, що із зростанням широти значення $\Delta\varphi$ убуває від 30 до $0,1^\circ$ у діапазоні широт $0-85^\circ$. За допомогою одержаної залежності можна визначити широти, в яких необхідно ввести нове значення широти в коректор. Звертаємо увагу, що похибку введення $\Delta\delta_{vm}$ не перевершуватиме допустимого значення $0,3^\circ$, якщо поточна широта φ_t належить інтервалу $[\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, межі якого задовольняє нерівності $(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \leq \Delta\varphi_{i+1}$, де значення, φ_i , φ_{i+1} і $\Delta\varphi_{i+1}$ вибираються з одержаних графічних залежностей.

Наприклад, для швидкості судна 20 вузлів (рис. 4) за даним принципом одержані наступні діапазони широт, при знаходженні поточної широти в яких корекція широти в настільному коректорі не потрібна. Одержані наступні діапазони широти: $[\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 20]$; $[\varphi_2 = 20, \varphi_3 = 33]$;

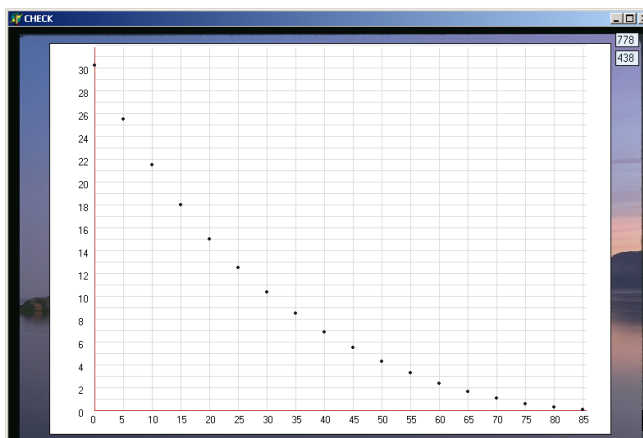


Рис. 2. Залежність $\Delta\varphi$ від широти φ_t для швидкості 30 вузлів

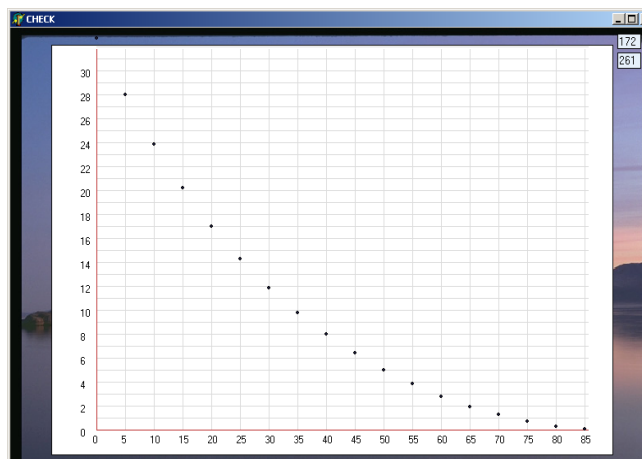


Рис. 3. Залежність $\Delta\varphi$ від широти φ_t для швидкості 25 вузлів

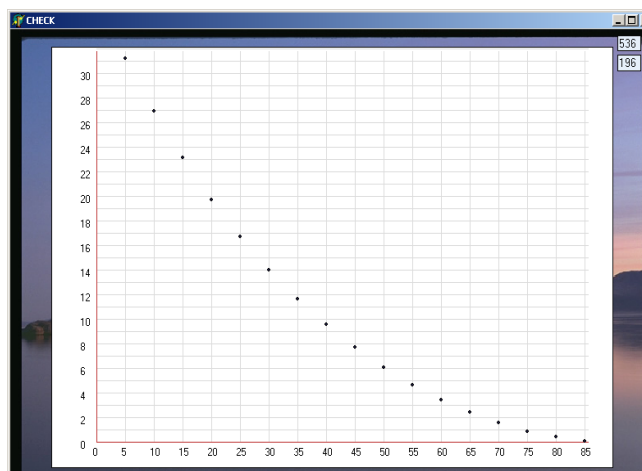


Рис. 4. Залежність $\Delta\varphi$ від широти φ_t для швидкості 20 вузлів

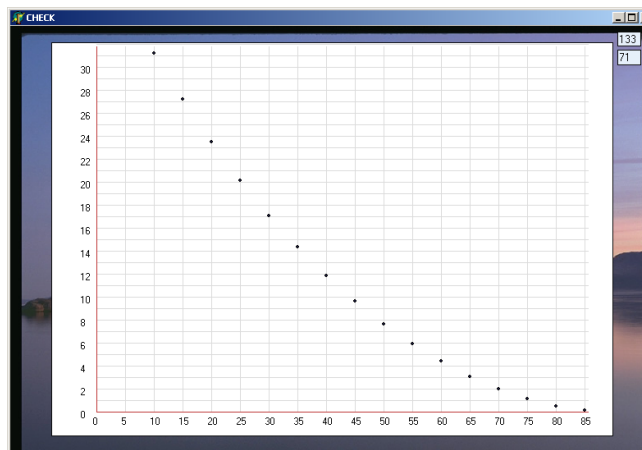


Рис. 5. Залежність $\Delta\varphi$ від широти φ_t для швидкості 15 вузлів

$[\varphi_3 = 33, \varphi_4 = 40]$; $[\varphi_4 = 40, \varphi_5 = 47]$;
 $[\varphi_5 = 47, \varphi_6 = 52]$; $[\varphi_6 = 52, \varphi_7 = 56]$; $[\varphi_7 = 56, \varphi_8 = 60]$;
 $[\varphi_8 = 60, \varphi_9 = 63]$; $[\varphi_9 = 63, \varphi_{10} = 65]$. Надалі із зростанням широти її введення в настільний коректор проводиться при зміні на 1° . Аналогічно знаходяться діапазони широти для інших швидкостей, використовуючи графіки рис. 3 – рис. 5.

Висновки

1. Отримано аналітичний вираз для розрахунку максимального значення некомпенсованої швидкісної похибки гірокомпасу.
2. Розраховано значення некомпенсованої швидкісної похибки гірокомпасу в залежності від різниці між поточною і введеною в коректор широтами, які

представлено в табличному вигляді.

3. Представлено графічні залежності різниці між поточною і введеною в коректор широтами від поточної широти для швидкості судна від 15 до 30 вузлів з метою визначення діапазонів широт, в яких коректор не потребує оновлення широти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Смирнов Е.Л. Технические средства судовождения. / Смирнов Е.Л. - М.: Транспорт, 2002. – 646 с.
2. Чапчай П.А. Технические средства судовождения/ Чапчай П.А. – Одесса : НУ «ОМА», 2019.-298 с.
3. Чапчай П.А. Электронавигационные приборы/ Чапчай П.А. – Одесса : ОНМА, 2012.-161 с.
4. Чапчай П.А. Современные морские системы курсоуказания/ П.А. Чапчай, Е.П. Чапчай, М.С. Алексейчук.– Одесса : ОНМА, 2014.- 171 с.
5. Морская навигационная техника. Справочник. Под общ. ред. Е.Л. Смирнова. — СПб.: “Элмор”, 2002. — 224 с.
6. Вагушенко Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика./ Вагушенко Л.Л.– Одесса: Латстар, 2003. – 169 с.

REFERENCES

1. Smirnov E. Hard wares of navigation. / Smirnov E. - M.: Transport, 2002. – 646 p.
2. Chapchay P. Hard wares of navigation / Chapchay P.– Odessa: NU «OMA», 2019.-298 p.
3. Chapchay P. Electro-navigation devices./ Chapchay P. – Odessa: ONMA, 2012.-161 p.
4. Chapchay P. Modern marine systems determinations of course./ Chapchay P., Chapchay E., Alekseychuk M.– Odessa: ONMA, 2014.- 171 p.
5. Smirnov E. Marine navigation technique. Reference book. / Smirnov E.— SPb.: “Elmor”, 2002. — 224 p.
6. Vagushchenko L. Integrated systems of vessel's bridge./ Vagushchenko L. – Odessa: Latstar, 2003. – 169 p.

Minimization of residual speed error to the gyro-compass with the autonomous management of sensible element M. Alekseychuk, P. Chapchay, V. Stepanenko

In work analytical expression for the calculation of maximal value of the uncompensated speed error is got to the gyro-compass. The value of the uncompensated speed error is expected to the gyro-compass depending on a difference between current one and entered in proof-reader by latitude, which are represented in a tabular kind. Graphic dependences of difference are represented between current and entered in proof-reader by latitude from a current latitude for speed of ship from 15 to 30 knots with the purpose of determination of ranges of latitudes, in which a proof-reader does not need update of latitude.

Keywords: exactness of navigation, gyro-compass, indemnification of speed error, residual speed error.