

УДК 629.5.058.44

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-79-92

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

Рябцов Олександр Васильович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
alex.ryabtsov@gmail.com

Організаційне вдосконалення технічної експлуатації волоконно-оптичних гіроскопів для суднових систем динамічного позиціонування

Ryabtsov Oleksandr
NU "Odessa Maritime Academy". Odessa. Ukraine
alex.ryabtsov@gmail.com

Organization improvement of technical maintenance of fiber optic gyroscopes for ship dynamic positioning systems

Резюме. Проаналізовано тенденцію заміни суднових механічних гірокомпасів на волоконно-оптичні інтерференційного типу, що підвищує їх надійність завдяки відсутності рухомих частин та пов'язаних із ними відмов. Запропоновано безперервний контроль стану оптичного волокна як чутливого елементу. Розглянуто організаційно-технічні заходи для вдосконалення експлуатації волоконно-оптичних гірокомпасів шляхом впровадження додаткового контролю параметрів, спрямованого на підвищення надійності систем динамічного позиціонування суден.

Summary. The trend of replacing ship mechanical gyrocompasses with fiber-optic interference-type gyrocompasses has been analyzed, which enhances their reliability due to the absence of moving parts and associated failures. Continuous monitoring of the optical fiber condition as a sensitive element is proposed. Organizational and technical measures to improve the operation of fiber-optic gyrocompasses through the introduction of

additional parameter control, aimed at increasing the reliability of ship dynamic positioning systems, are considered.

В зв'язку з безперервним скороченням доступних запасів мінеральних ресурсів дедалі більша частка корисних копалин видобувається на морському шельфі. У багатьох країнах офшорна промисловість стає пріоритетною галуззю економіки. При цьому в більшості районів, де корисні копалини залягали на невеликій глибині, що раніше дозволяло використовувати традиційні видобувні установки стаціонарного типу, які спиралися на підводний ґрунт, ресурси вже значною мірою вичерпані. Для пошуку та розробки нових глибоководних родовищ використовуються як самохідні, так і несамохідні плавучі об'єкти. До самохідних зазвичай відносяться сейсморозвідувальні, бурові та допоміжні судна, до несамохідних - бурові або видобувні платформи, що буксируються суднами. Для їхньої ефективної роботи першочергового значення набувають системи стабілізації становища цих плавучих об'єктів відносно робочої позиції на морському дні.

Для цієї мети були розроблені спеціалізовані системи автоматичного управління судновими рушіями або якірними лебідками, що дозволяють утримувати судно в заданій точці при дії таких дестабілізуючих факторів, як вітер, течія і хвилювання водного середовища. Такі види систем отримали назву систем динамічного позиціонування (ДП) або якірного позиціонування (ЯП) [1, с. 216]. Незважаючи на високу вартість та складність, ці системи нині перебувають у процесі прискореного розвитку. Кількість компаній, що займаються їхньою розробкою, з кожним роком зростає, а також розширюється сфера їх застосування.

Однією з найважливіших складових кожної з таких систем позиціонування є так звана референсна система, що дозволяє обчислити координати плавучого об'єкта у відкритому морі з високою точністю. Значення похибки позиціонування об'єкта у відкритому морі для більшості систем позиціонування середньої складності становить 0,5 - 2 м, однак у системах з диференціальною корекцією (GNSS augmentation) вона досягає одиниць сантиметрів. Очевидно, що така точність не може бути досягнута без застосування сучасних високоточних вимірювальних пристроїв, результати вимірювання яких надходять до спеціалізованих суднових обчислювальних комплексів, що виробляють математичну обробку отриманої інформації з метою отримання найбільш достовірного результату.

До складу будь-якої референсної системи входить кілька підсистем, що одночасно визначають координати судна, його курс, параметри зовнішніх впливів, кути відхилення та зміщення щодо заданої точки тощо. Зупинимося лише на одній підсистемі, що вимірює курс судна.

Традиційним способом визначення курсу судна був магнітний компас, який і досі займає заслужено шановане місце на будь-якому найсучаснішому судні. Однак, внаслідок мінливості магнітного поля Землі та паразитного впливу від металевих частин судна і працюючого судового обладнання, магнітні компаси не можуть забезпечити необхідної точності та стабільності показань, тому в даний час вони використовуються на судах лише як резервний засіб вимірювання.

Нині відомо багато різних типів фізичних явищ, на підставі яких можливе створення гіроскопічних приладів. Однак для цілей практичної навігації застосовують в основному два види гірокомпасів: механічні та оптичні. Сучасні механічні у свою чергу поділяються на інерційні та вібраційні, та позначаються відповідно DTG і MEMS. Оптичні також поділяються на оптоволоконні та лазерні з позначеннями FOG і RLG [2]. У сучасній морській практиці найбільш широко застосовуються інерційні механічні гірокомпаси рідинного типу, в конструкцію яких входить гіросфера, що обертається, вільно плаваючі в підтримуючій рідині. Щільність і температуру такої рідини підбирають таким чином, щоб сила, що виштовхує гіросферу, компенсувала її вагу, і тим самим запобігають дотику сферою до внутрішніх стінок або донця резервуара. Також для точної компенсації ваги гіросфери створюється примусова циркуляція вертикальної рідини всередині резервуара. Усередині самої сфери знаходяться електромотори, що забезпечують її обертання з високою швидкістю, що створює гіроскопічний ефект. Вільно обертаючись в рідині гіросфера зберігає постійне становище у просторі за будь-яких відхиленнях судна. Спеціальні датчики кутових відхилень дозволяють з високою точністю визначити кут прецесії, тобто відхилення на курсу судна від встановленого напрямку.

Досвід практичної експлуатації гірокомпасів, що забезпечують роботу судна в режимах динамічного позиціонування, показує, що, незважаючи на ретельно розроблену конструкцію та високу якість виготовлення сучасних морських гірокомпасів, інтенсивність їх відмов у складних морських умовах може перевищувати нормоване значення. Існуючі графіки технічного обслуговування судових гірокомпасів, розроблені на основі рекомендацій їх виробників, передбачають, що плановий інтервал безвідмовної роботи між двома технічними обслуговуваннями, зокрема без заміни підтримуючої рідини, становить

не менш ніж 18 місяців [3]. Однак важкі умови експлуатації викликають прискорене погіршення властивостей рідини та інші відмови, які призводять до неочікуваних збоїв у роботі гірокомпасів.

Рівноважне положення гіросфери, що обертається, порушується також при впливі ударів хвиль у штормових умовах або сильної вібрації при роботі потужних суднових механізмів. При цьому внаслідок маятникового ефекту виникає інтеркардинальна девіація, що знижує точність гірокомпасу. Для зменшення впливу качки виробники використовують різні методи, наприклад застосування двох гіроскопів в одній гіросфері, що збільшує складність пристрою і знижує його загальну надійність. Ще одним методом зменшення девіації є підвищення в'язкості рідини, що підтримує, але це збільшує споживання потужності при прокачуванні рідини і розкручуванні гіросфери.

Крім того, при погіршенні якості або рівня рідини, що підтримує, можливі короткочасні торкання сферою внутрішніх поверхонь резервуара. Це явище призводить до передчасного зношування її електричних контактів, і, що особливо неприпустимо, викликає «підгальмовування» сфери, яке також веде до неприпустимого зростання похибки вимірювань курсу судна. Крім цього, досить часто спостерігається підвищене зношування карданних підвісів, пересихання силіконових шлангів у місці їх приєднання до штуцерів насосів системи циркуляції підтримуючої рідини, що призводить до втрати їх еластичності або розтріскування і, відповідно, до витoku рідини. Такий дефект практично завжди призводить до виходу гіросфери з ладу та необхідності її повної заміни.

Розбирання та якісний ремонт гіросфери в суднових умовах практично неможливі, а зберігання запасних гіросфер на судні зазвичай недоцільно через їхню велику вартість та складність підтримки потрібних умов зберігання, тому будь-яка поломка гірокомпасу зазвичай повністю виводить його з експлуатації. У цьому виникає серйозна проблема, що з вимушеним скороченням сертифікованої конфігурації системи ДП. Невідповідність системи ДП необхідному класу позбавляє судно можливості продовжувати виконувати заплановану роботу відповідно до контракту, що практично завжди призводить до суттєвих фінансових втрат.

У зв'язку з цим питання правильної організації технічної експлуатації таких важливих елементів суднових систем ДП, як гірокомпаси, стає пріоритетним для судовласника.

Проблема полягає у тому, що, при наявності на судні, наприклад, трьох справних гіроскопів, тобто при конфігурації, яка відповідає класу

DP Class2, питання вибору справжнього значення курсу судна вирішується шляхом "голосування" (voting). При цьому з трьох показань різних гіроскопів правильним визнаються лише ті два, які повністю збігаються. Показання третього гіроскопа, що навіть трохи не збігаються з двома іншими, навіть за його повної працездатності будуть відкидатися системою як помилкові. Така ситуація трапляється при довготривалій роботі гірокомпасу без корекції з поступовим накопичення постійної помилки дрейфу, або при нестабільному електроживленні. При виході одного гіроскопа з ладу виникає дилема вибору правильного показання між двома, які залишилися. Якщо вони збігаються, то приймаються як єдино правильне, але якщо їх показання теж будуть відрізнятися, то ДП-оператор повинен самостійно прийняти рішення, якому з двох гіроскопів, що продовжують працювати, він довіряє більше. Рішення приймається оператором з урахуванням статистичного аналізу похибок показань за попередній період роботи. У такому випадку в активному стані залишається лише один з трьох судових гірокомпасів, який продовжує передачу показань в систему ДП. Інші гірокомпаси переводяться в неактивний режим, при цьому система ДП втрачає надмірність і переходить у конфігурацію класом нижче.

В попередні роки єдиним способом підвищення точності та достовірності показів референсної системи ДП в процесі позиціонування судна було забезпечення надлишковості системи за рахунок включення додаткової кількості дублюючих елементів. З появою нових типів гірокомпасів, які не мають механічних елементів, що рухаються, завдання дещо спростилося. Замість збільшення кількості механічних гірокомпасів для забезпечення необхідного рівня надійності системи ДП використовують оптоволоконні гірокомпаси, що теоретично мають значно більшу надійність чутливого елемента. На відміну від розглянутих вище механічних гірокомпасів, що мають складні конструкції і вимагають ретельного налагодження та періодичної корекції показань, чутливий елемент нових гіроскопів являє собою простий відрізок оптичного волокна довжиною не менше 1000 м, розташований в захисному боксі у вигляді вільно намотаних кілець або петель.

Однак такі переваги, як простота і надійність чутливого елемента оптоволоконного гірокомпасу, в деякій мірі пригнічується тією обставиною, що для вимірювання надзвичайно малих фазових відхилень оптичних сигналів малої інтенсивності потрібні дуже складні електронні пристрої, які мають велику вартість. Остання обставина є причиною того, що традиційні механічні гірокомпаси

продовжують використовуватись на більшості ДП суден. Конфігурація багатьох систем ДП на суднах, що знаходяться в експлуатації в даний час, все ще передбачає наявність як мінімум двох рідинних механічних гірокомпасів, до яких додається один волоконно-оптичний гірокомпас (ВОГ), який теоретично має більш високу надійність і точність. Слід зазначити, що в деяких випадках конфігурацію референсної системи можуть додаватися також DGPS-компаси, але такі компаси не вимірюють кутові відхилення, а обчислюють їх непрямым шляхом, тому їх розгляд не входить до цієї теми.

Принцип роботи ВОГ, заснований на ефекті Саньяка [4], який було відкрито ще в 1913 році. Проте широке практичне застосування даний тип гірокомпасів знайшов лише нещодавно у зв'язку з попитом на пристрої гіростабілізації траєкторій руху мобільних об'єктів.

Конструкція оптоволоконного гірокомпасу досить проста. Оптична вимірювальна частина на основі інтерферометра визначає різницю довжини оптичних шляхів двох променів, що розповсюджуються в оптичному волокні у протилежних напрямках. Електронна частина вимірювальної схеми обчислює фазовий зсув променів, і, отже, величину кутового повороту приладу в інерційній системі відліку, пов'язаної з положенням судна. Оскільки величина $\Delta\varphi$ дуже мала, її пряме вимірювання за допомогою пасивних інтерферометрів можливе лише при довжині волокна не менш 1000 м [5].

Заміна механічних гіроскопів волоконно-оптичними мала суттєво підвищити надійність суднових систем динамічного позиціонування та знизити витрати на їх технічне обслуговування. Однак, як часто трапляється при впровадженні технічних новинок, очікування не зовсім виправдалися. Незважаючи на таку безперечну перевагу ВОГ, як повна відсутність рухомих механічних частин і використання в якості чутливого елементу простого, надійного і дешевого відрізка оптоволокна, виявилось, що ВОГ мають цілу низку недоліків. Більшість виробників оптоволоконних гіроскопів, такі як Sperry Marine, стверджують, що оптоволоконні гірокомпаси, які ними випускаються, наприклад, NAVIGAT 2500 Fiber Optic Gyro Compass, відносяться вже до класу MF (maintenance free), тобто не вимагають ніякого технічного обслуговування, а також забезпечують значно вищі точність і надійність ніж попередні механічні версії. Але просте порівняння між паспортними даними двох зразків їхньої продукції показує, що їхні відмінності не мають принципового характеру [6].

Результати порівняння специфікацій волоконно-оптичного гірокомпасу NAVIGAT 2500 та механічного рідинного NAVIGAT 200 компанії Sperry Marine наведено у таблиці.

Таблиця

Параметри гірокомпасів

Технічні параметри	NAVIGAT 2500 Fiber Optic Gyro Compass	NAVIGAT 200 Spinning mass compass
Точність курсу / Heading accuracy	≤ 0.23 deg. secant latitude (RMS)	$\leq 0.4^\circ$ secant latitude (avrg)
Допустима швидкість повороту / Rate of Turn	$\leq 0,06$ deg/ min	$\leq 0.5 \pm 5\%$ °/min
Допустимі кути крену / Roll/Pitch angle	Roll/Pitch angle 0.5° RMS	Freedom of Roll & Pitch $\pm 40^\circ$
Надійність (напрацювання на відмову) / Mean Time Between Failure (MTBF)	150,000 hrs	120,000 hrs

До негативних факторів, що знижують точність вимірювань ВОГ та його загальну надійність як елемента системи ДП, можна віднести:
внутрішні та зовнішні втрати потужності в оптичному волокну;
флуктуації коефіцієнта пропускання по довжині волокна, що призводять до появи дробових шумів;
чутливість до зовнішніх впливів, таких як вібрації та удари;
температурні зміни, а також довготривалі стискаючі механічні навантаження;

девіація ступеня та кута поляризації по довжині волокна.

Внутрішні втрати потужності оптичного волокна складаються з втрат на поглинання, дисперсійних втрат і втрат на розсіювання, спричинених структурними дефектами або якістю оптичного волокна. Зовнішні втрати оптичного волокна виникають через втрати на з'єднаннях та відгалужувачах променю та втрат на вигинах або деформаціях волокна.

Ключову роль у забезпеченні точності та стабільності показань ВОГ гірокомпасу відіграє якість оптичного волокна. В даний час застосовують два види оптоволокна: скляне та полімерне. Найбільш високоякісне скло з плавленого кварцу з високим ступенем очищення застосовується для виготовлення ВОГ для морських суден, що випускаються компаніями Anschütz (Німеччина), Furuno (Японія), Teledyne TSS (США), Sperry Marine (США), GEM Elettronica (Італія) та деякими іншими. Однак вартість таких ВОГ дуже висока, тому такі

виробники як Eгіссо (Китай) та iX Blue (Франція) освоїли виробництво гірокомпасів на основі полімерного оптоволокна. Полімерне оптоволокно має ряд недоліків у порівнянні зі скляним, що обмежує його застосування у високоточних системах. Однак наростаюча тенденція до всебічного скорочення витрат і підвищення економічної ефективності морських перевезень, а також світова економічна криза, що посилюється, роблять полімерне оптоволокно більш конкурентним.

Основними недоліками чутливих полімерних елементів гірокомпасів є:

- вищі оптичні втрати ніж у склі;

- менша пропускна здатність волокна;

- найгірша температурна стабільність;

- додаткові втрати внаслідок більшої чутливості до деформацій волокна;

- менша довговічність внаслідок меншої стійкості до зовнішніх дій.

Ці недоліки оптоволокна не дозволяють дістатися потрібного рівню надійності гірокомпасів, тому логічно запропонувати застосування автоматичного тестування стану оптичних і електронних елементів ВОГ, а також діагностування та прогнозування їх відмов за рахунок використання нових алгоритмів обробки даних.

Для якісної оцінки стану оптичної вимірювальної системи ВОГ виникає необхідність проведення складних вимірювальних процедур, які раніше проводилися лише для лабораторних досліджень. Для цього можна скористатися вже відомими методами контролю стану оптоволокна, реалізованими в системах моніторингу оптичних мереж зв'язку, наприклад, таких як система автоматичного моніторингу оптичних волокон DTS (Distributed Temperature Sensing) [7], і система NewNets FiberWatch2 [8]. Такі системи дозволяють автоматично визначати відхилення параметрів оптичного волокна та виявляти можливі несправності на ранніх стадіях. До структури системи DTS входять: джерело тестового випромінювання (одномодовий оптичний лазер), волокно, оптичні роздільники, фільтри і детектор зворотного розсіяного випромінювання. Аналіз та обробка інформації про стан волокна здійснюються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Метод FiberWatch пропонує проактивний контроль волоконно-оптичної лінії на основі Remote Test Units (RTU), оснащених модулями оптичних рефлектометрів (OTDR), які підключаються до оптичних волокон через модулі оптичного перемикача (Optical Test Access Unit, OTAU). Модулі OTDR виконують тестування оптоволокна, вимірюючи такі параметри, як відхилення довжини хвилі та динамічний діапазон.

Ці методи були впроваджені, коли з'ясувалося, що основним фактором зниження якості оптоволокна є температурний градієнт волокна, а також механічні напруги в ньому при вібраціях, які призводять до виникнення "уявної кутової швидкості". Особливо небезпечний вплив мають постійні збільшення температури, навіть невеликі і з малою швидкістю наростання, але такі що викликають тривалі теплові дрейфи ВОГ. Причиною даного явища є зміна показника заломлення волокна внаслідок п'єзооптичного ефекту в умовах появи термічних напружень в оптичному контурі.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що для підвищення надійності ВОГ і зниження вартості експлуатаційних витрат за рахунок раціональної організації технічного обслуговування обладнання систем ДП, структура волоконно-оптичного гірокомпасу повинна містити не тільки основний оптичний вимірювальний тракт, але і додатковий оптичний канал, що дозволяє здійснювати моніторинг стабільності параметрів чутливого елементу ВОГ. Така система моніторингу має забезпечувати:

- вимірювання відхилень параметрів оптичних елементів гірокомпасу;

- автоматичне виявлення інших несправностей та пошкоджень в оптичних елементах ВОГ;

- на базі аналізу відхилень прогнозування зміни параметрів оптичних та електронних елементів ВОГ.

Контроль стану оптичних волокон можна реалізувати на основі оптичних імпульсних рефлектометрів, що діагностують стан волокна за зворотним розсіюванням світлової хвилі при введенні в волокно зондувальних імпульсів.

Спрощена оптична функціональна схема ВОГ, оснащеного тестовим каналом моніторингу, наведено на рисунку.

Вимірювальна частина цієї схеми не відрізняється від класичної конструкції гіроскопа, що базується на ефекті Саньяка. Вона виконує основне завдання визначення курсу судна шляхом вимірювання кута зсуву фаз між двома оптичними променями, що поширюються по кільцевому шляху, утвореному вільно укладеним оптоволоконном. Два зустрічно спрямованих оптичних потоку f_{B1} і f_{B2} утворюються у вимірювальній системі шляхом поділу напівпрозорою дзеркальною поділяючої пластинкою на два протилежно спрямовані промені.

Для забезпечення безперервного циркуляції променів у волокні використовується лазерний діод підживлення з розподіленим зворотним зв'язком (DBF LD, distributed feedback laser), що працює в оптичному діапазоні випромінювання з довжиною хвилі 1550 нм. У

стані спокою гірокомпаса, завдяки симетрії оптичної схеми, між променями зберігається нульова різниця фаз. При поворотах гіроскопа внаслідок релятивістського закону складання швидкостей утворюється пропорційний зсув фази між променями.

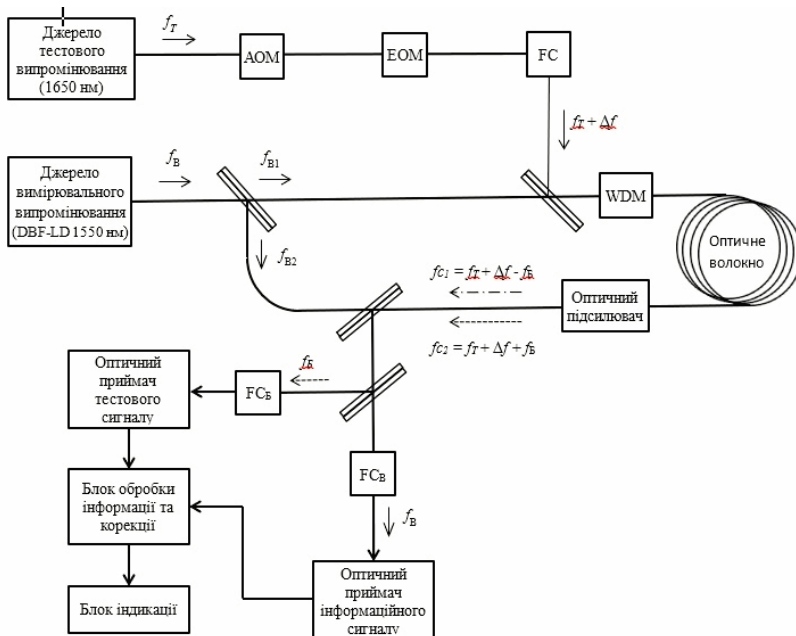


Рис. Схема оптичного тракту волоконно-оптичного гірокомпаса, оснащеного тестовим каналом для моніторингу технічного стану

У найпростішому випадку кільцевої намотування оптоволокна фазовий зсув між променями може бути розрахований за відомою формулою для інтерферометра Саньяка:

$$\Delta\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega,$$

де $\Delta\varphi$ - різниця фаз, що виникає між променями в оптоволокну, R - радіус контуру намотування оптоволокна, L - довжина відрізка оптоволокна, λ - довжина хвилі вимірювального випромінювання, C -

швидкість світла у вакуумі, Ω - кутова швидкість обертання гіроскопа [9].

Крім вимірювального тракту до складу оптичної схеми гірокомпаса додано тестуючий тракт, який складається з джерела тестуючого випромінювання, яке частотне рознесено з основним гіроскопічним вимірювальним сигналом, двох додаткових віддзеркалювачів, фільтра, приймача оптичного тестового сигналу та блоку обробки інформації. Призначення тестуючого тракту - безперервний моніторинг стану оптичних елементів гірокомпаса з метою визначення параметрів та передбачення моменту їх переходу до граничного стану.

Принциповою відмінністю моніторингу стану об'єкта від моніторингу його параметрів полягає у отриманні результату у вигляді експертної оцінки його стану та прийняття управлінського рішення про подальші дії з об'єктом.

Світло в оптоволокну розсіюється на мікроскопічних неоднорідностях, розмір яких менший за довжину хвилі. Це розсіяне світло, що сприймається в оптичному приймачі, містить як мінімум три компоненти: одну з вихідною довжиною хвилі, обумовлену релеєвським розсіюванням, і дві компоненти зворотного розсіювання Мандельштама-Брілюена, що мають зсув спектра внаслідок неоднорідностей в волокну, так звані стоксову ($f_T + \Delta f - f_B$) і антістоксову ($f_T + \Delta f + f_B$). Інтенсивність антістоксової компоненти залежить від температури оптоволокну, що дає можливість якісної оцінки його стану [10].

Тестова частина оптичної системи БОГ є рефлектометр, що працює за принципом вимірювання інтенсивності розсіювання Брілюена (BOTDR, Brillouin Optical Time Domain Reflectometer), і що вимірює тимчасові залежності зсуву частот зворотного розсіювання щодо вихідної частоти тестового оптичного випромінювання. Переваги BOTDR рефлектометрів полягають у великому динамічному діапазоні в порівнянні з рефлектометрами OTDR і малими похибками [11]. Джерелом тестового випромінювання також служить DFB лазер із довжиною хвилі 1650 нм, частотна модуляція тестового сигналу здійснюється акустооптичною коміркою (АОМ), імпульсна модуляція - електроабсорбційним модулятором (ЕОМ). Для поляризаційної модуляції тестового випромінювання f_T використовується фільтр (FC). Тестове випромінювання накачування вводиться у кільце оптоволокну та змішується мультиплексором WDM (Wavelength Division Multiplexing) з оптичним сигналом вимірювального тракту f_B .

При проходженні тестового сигналу повздовж кільця оптоволокну частка оптичної енергії у вигляді бриллюенівського розсіювання, яке

відбивається від неоднорідностей структури, передається за допомогою відгалужувачів через розподільчий фільтр ФС_Б на вхід фотоприймача тестового випромінювання, а потім на блок обробки та аналізу стану волокна (див. рисунок). Результат визначення курсового кута судна та результат аналізу інформації про стан гірокомпасу виводиться на індикаторну панель, а також надходять до системи ДП.

Таким чином, впровадження діагностичних методів для аналізу стану волоконно-оптичних гірокомпасів для систем ДП дозволять отримати об'єктивну інформацію, необхідну для правильної організації їх технічної експлуатації та складання обґрунтованих графіків профілактичного обслуговування, а також значно скоротить час ремонту (MTTR) за рахунок швидкого виявлення та локалізації несправностей.

Аналіз можливих шляхів удосконалення суднових гірокомпасів для підвищення надійності систем динамічного позиціонування дозволяє сформулювати кілька висновків.

1. Підвищення надійності ВОГ шляхом переходу на використання тільки високоякісного кварцового оптоволокна малоймовірно тому що вимагає застосування значно кращих технологій очищення сировини та більш енергоємного обладнання, що суттєво здорожує виробництво ВОГ.

2. Зниження вартості ВОГ при збереженні точності та надійності можливе за умови розробки нових типів полімерного оптоволокна з меншими спотвореннями та вищою стабільністю параметрів. Робота в цьому напрямку ведеться безперервно, так само, як і пошук нових методів та засобів гіроскопічних вимірів.

3. Усунення дестабілізуючих факторів шляхом повної ізоляції гірокомпасу від зовнішніх впливів, таких як вібрації, температурні коливання, зовнішні електромагнітні поля, та інші, дозволить зменшити похибки та підвищити надійність ВОГ, проте вимагатиме додаткових організаційно-технічних заходів та суттєвих фінансових витрат. Це може бути ефективним рішенням в окремих випадках, але для масового застосування на судах не підходить.

4. Такі процедури технічної експлуатації існуючих моделей механічних гірокомпасів, як початкове налаштування гірокомпасу на істинний меридіан, періодичне ручне коригування його показань та регулярні перевірки його працездатності завжди були передбачені виробниками гірокомпасів в інструкціях з експлуатації. Тож підтримувати потрібну надійність ВОГ, в яких ще не запроваджені алгоритми тестового аналізу стану волокна, допомогла б відповідна організація їх технічного обслуговування, наприклад впровадження

періодичного контролю їх оптичних параметрів за допомогою портативних рефлексометрів, таких як, наприклад, Grandway M1000-D22-PRO, розроблених для оперативного тестування наземних ліній оптичного зв'язку. Однак це рішення передбачає організацію та проведення додаткової спеціальної підготовки судового персоналу або використання певної кількості залучених берегових фахівців, що не завжди є економічно ефективним рішенням.

5. Можна припустити, що найбільш перспективним шляхом зниження ймовірності несподіваних відмов гірокомпасів суден, що призводять до аварійного виходу судна з режиму ДП, буде впровадження автоматичного тестування стану оптичного каналу ВОГ. Розробка нових алгоритмів прогнозування відмов на підставі аналізу відхилень параметрів може значно покращити надійність ВОГ та систем ДП в цілому.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Правила класифікації та побудови морських суден. Том 4. / Регістр судноплавства України. - К.: Регістр судноплавства України, 2020. – 558 с.
2. Gyrocompasses. Electronic resource: [www. geo-matching.com](http://www.geo-matching.com). URL: <https://geo-matching.com/categories/gyrocompasses>.
3. Sperry_Navigat_x_MKI_Gyro_-_Operation-Installation-Service_Manual. Electronic resource: www.sperrymarine.com. URL: [Sperry_Navigat_x_MKI_Gyro_-_Operation-Installation-Service_Manual.pdf&usg=AOvVaw2KkO8vNbq4tw2uINpSpZun&opi=89978449](http://www.sperrymarine.com/Manual.pdf&usg=AOvVaw2KkO8vNbq4tw2uINpSpZun&opi=89978449).
4. Андропова, И. А., Малькин, Г. Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка. // УФН. - 2002. - Т. 172. - № 8. - С. 849 – 873. DOI:10.3367/UFNr.0172.200208a.0849
5. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – Кн. 1. – 380 с.
6. Sperry Marine. NAVIGAT 2500 Fiber Optic Gyro Compass. Electronic resource: www.sperrymarine.com. URL: <https://www.sperrymarine.com/solutions/compass/navigat-2500>.
7. A Remote Fiber Test System (RFTS) for continuous network monitoring. Electronic resource: www.ntestinc.com. URL: <https://www.ntestinc.com/fiberwatch-by-ntes>.
8. DTS Fiber Optic Sensor Cables. Electronic resource: www.sensornet.co.uk. URL: <https://www.sensornet.co.uk/sensor-cables/>

9. Волоконно-оптичний гіроскоп. Електронний ресурс. Режим доступу: https://ua.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптичний_гіроскоп

10. Некрасов, С. Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей // Технологии и средства связи. – 2000. – №5. – С. 28 - 32.

11. Zhu Fan, Xuping Zhang, Junhui Hu, Yixin Zhang. Design fast pulse coding/decoding system for BOTDR // Photonics Global Conference (PGC). – 2012. – P. 1 - 6.

Abstract. *This article analyzes the practical experience of using mechanical and fiber-optic gyrocompasses in offshore ship dynamic positioning (DP) systems. It examines the advantages and disadvantages of currently used gyroscopic devices in the maritime fleet and identifies the main causes of their failures during operation.*

To enhance the overall operational reliability of ship DP systems, the study proposes improving the organizational principles of constructing measurement circuits for fiber-optic gyrocompasses. Specifically, it suggests introducing an additional test signal into the gyrocompass measurement channel. This signal would be transmitted through an optical fiber segment of at least 1000 meters in length, allowing for analytical assessment of fiber parameter deviations under internal and external destabilizing factors. Such an approach would enable a prognostic evaluation of the gyrocompass's reliability.

To assess the fiber's condition, both manual testing using a portable interferometer and automated testing with additional test signals can be employed. The study advocates for a testing method based on Brillouin scattering on fiber inhomogeneities, a technique that has proven effective in communication technology.

As a result of this analysis, the article suggests possible directions for improving DP system reliability through organizational and technical solutions. These improvements focus on enhancing fiber-optic gyrocompass designs by incorporating operational monitoring methods to track the sensitive element's current status and predict future parameter changes. Implementing these solutions would facilitate rational maintenance planning, optimize gyrocompass servicing, and reduce DP system dependence on unexpected failures.