

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ
ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АВІОНІКИ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускної кафедри
д.т.н. С.В. Павлова

«___» _____ 2022 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
“БАКАЛАВР”
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 АВІОНІКА**

Тема: «Метод визначення навігаційних параметрів польоту літака на основі поляриметрії»

Виконавець: _____ Романенко Олексій Вікторович

Керівник: _____ д.т.н., Тачиніна Олена Миколаївна

Нормоконтролер: _____ В. В. Левківський
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

« ____ » _____ 2022р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Романенко Олексій Вікторович

1. Тема: «Метод визначення навігаційних параметрів польоту літака на основі поляриметрії».
2. Термін виконання роботи: з 16 травня 2022 року по 19 червня 2022 року
3. Вихідні дані до роботи: методика для вимірювання магнітного курсу літака на основі поляриметра.
4. Зміст пояснювальної записки: прилади магнітного курсу, поляриметр та поляриметрия, обертання площини поляризатора з використанням феромагнітних матеріалів, датчики на основі поляризованого світла.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: Ілюстративний матеріал в обсязі, що дозволить розкрити суть дипломного проекту.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Аналіз літературних джерел. Аналіз аналогічних існуючих систем та постановка задачі на дослідження.	02-08.05.22	
2	Написання першого розділу пояснювальної записки	09-15.05.22	
3	Написання другого розділу пояснювальної записки	16-22.05.22	
4	Написання третього розділу пояснювальної записки	23-29.05.22	
5	Оформлення пояснювальної записки	30-02.06.22	
6	Рецензування дипломної роботи	03-6.06.22	
7	Підготовка доповіді та оформлення презентації дипломної роботи	07-13.06.22	

8. Дата видачі завдання: «05.04» 2022 р.

Керівник дипломної роботи _____ Тачиніна О.М.

Завдання прийняв до виконання _____ Романенко О.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Метод визначення навігаційних параметрів польоту літака на основі поляриметрії» :

Об'єкт дослідження – процес вимірювання горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі.

Предмет дослідження – пристрій для вимірювання магнітного курсу літака за допомогою поляриметра.

Мета дипломної роботи – підвищення точності параметру магнітного курсу на повітряному судні завдяки розробленому пристрою в основі якого лежить поляриметричний метод вимірювання.

В роботі представлено розробку пристрою для вимірювання магнітного курсу літака. Принцип його дії ґрунтується на поляриметричному методі вимірювання. Чутливим елементом цього пристрою є комірка Фарадея, яка реагує на магнітне поле Землі, змінюючи при цьому пропорціонально кут повороту площини поляризації світлового променя поляриметра. Пристрій для вимірювання магнітного курсу є безплатформним і здійснює вимірювання компонентів магнітного поля відносно трьох осей, які прив'язані до системи координат літака. Такий тип конструкції та застосування поляриметричного методу вимірювання дає можливість зменшити габарити до розміру мініатюрних та масу пристрою, що розроблявся. Також така конструкція дозволяє значно підвищити точнісні характеристики вимірювача магнітного курсу.

МАГНІТНИЙ КУРС, КУРС ЛІТАКА, ПОЛЯРИМЕТР, ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО КУРСУ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ПРИЛАДИ МАГНІТНОГО КУРСУ

- 1.1. Магнітне поле Землі. Використання магнітного поля для вирішення задач орієнтації та навігації
- 1.2. Визначення курсу об'єкта за допомогою МПЗ
- 1.3. Магнітний компас
- 1.4. Індукційні датчики магнітного курсу
- 1.5 Безплатформова система визначення магнітного курсу

РОЗДІЛ 2. ПОЛЯРИМЕТРИ ТА ПОЛЯРИМЕТРІЯ

- 2.1. Пристрій
- 2.2. Саморобний полярископ
- 2.3. Сутність поляриметричного аналізу (поляриметрія)
- 2.4. Похибки вимірювальних приладів

РОЗДІЛ 3. ОБЕРТАННЯ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА

- 3.1. Магнітом'які високочастотні матеріали
- 3.2. Поздовжній магнітооптичний ефект Фарадея
- 3.3. Спосіб реєстрації кута обертання площини поляризації світлового променя з використанням оптично прозорих феромагнітних кристалів
- 3.4. Розрахунок параметрів поляриметра
- 3.5. Датчики на основі поляризованого світла
- 3.6. Підвищення якісних характеристик вимірювальних комплексів

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МЗП – магнітне поле Землі

МК – магнітний курс

ІК – істинний курс

КК – компасний курс

СОНКР – системи орієнтації, навігації та керування рухом

НК – навігаційний комплекс

ТО – технічне обслуговування

ПС – повітряне судно

ОФК – оптимальний фільтр Калмана

ВСТУП

Вимірювання – єдиний засіб одержання кількісної інформації про величини, які характеризують ті чи інші фізичні явища та процеси. Згідно з ДСТ під вимірюванням розуміють знаходження дослідним шляхом за допомогою технічних засобів значень фізичної величини, які вибираються з прийнятої шкали цих значень.

Вимірювальне перетворення являє собою відображення розміру однієї фізичної величини розміром іншої фізичної величини, що функціонально з нею пов'язана.

Використання вимірювальних перетворень є єдиним методом практичної побудови будь-яких вимірювальних пристроїв, тому що кожний вимірювальний засіб використовує ти чи інші функціональні зв'язки (найпростіші або більш складні) між вхідною та вихідною величинами. Так, якщо розуміти під функціональним перетворенням і масштабне перетворення у вигляді множення на сталий коефіцієнт (в тому числі такий, що дорівнює одиниці), то таке перетворення має місце і в найпростіших приладах, наприклад, в вільному гіроскопі, в якому вимірювана величина (кут повороту основи) відраховується по куту повороту рамок підвісу з коефіцієнтом перетворення, що дорівнює одиниці. В інтегруючому гіроскопі таке перетворення проводиться з коефіцієнтом, який може відрізнятися від одиниці в той чи інший бік.

Вимірювальний перетворювач – це технічний пристрій, який побудований на певному фізичному принципі дії і виконує одне часткове вимірювальне перетворення. Поняття “вимірювальний перетворювач” значно більш вузьке, більш конкретне, ніж поняття “вимірювальне перетворення”, тому що одне й теж вимірювальне перетворення може виконуватися цілою низкою різних за принципом дії вимірювальних перетворювачів. Так, вимірювання кутової швидкості повороту основи може бути здійснене механічними гіроскопами, хвильовими та лазерними пристроями, тощо.

РОЗДІЛ 1

ПРИЛАДИ МАГНІТНОГО КУРСУ

Магнітне поле Землі. Використання магнітного поля для вирішення задач орієнтації та навігації.

Земля в магнітному відношенні являє собою величезний за розміром, але слабкий за силою магніт з двома полюсами. Магнітні полюси знаходяться порівняно недалеко від географічних полюсів. Спостереження доводять, що магнітні полюси не залишаються нерухомими, а поступово змінюють своє положення відносно географічних полюсів. Так, в 1600 році північний магнітний полюс знаходився на відстані 1300 км. від географічного, а в даний час - приблизно в 2000 км. Сьогодні північний магнітний полюс має координати $70^{\circ}50'$ північної широти та 96° західної довготи. За останні 9000 років полярність магнітного поля Землі(МПЗ) не змінювалась, але на протязі існування Землі воно неодноразово міняло свій напрямок на протилежний.

В південному магнітному полюсі зосереджений позитивний магнетизм, в північному - негативний. Простір навкруг Землі пронизують магнітні силові лінії, які виходять с південного магнітного полюса, огинають земну кулю та замикаються на північному полюсі.

Є декілька джерел магнітного поля Землі(МПЗ). З одного боку це поле обумовлене процесами, що протікають в надрах Землі, з другого боку воно викликане причинами космічного походження і тісно пов'язане з діяльністю Сонця.

МПЗ, як і інші силові поля, характеризується в кожній точці простору вектором напруженості \vec{H} . Цей вектор спрямований по дотичній до силових ліній магнітного поля Землі.

Вертикальний кут I між вектором та площиною горизонту (рис. 1.1) зветься кутом магнітного нахилення (магнітним нахиленням).

Вектор напруженості розкладається на горизонтальну H та вертикальну Z складові: (1.1).

Загалом площина магнітного меридіану не співпадає з площиною географічного меридіану. Горизонтальний кут δ , між напрямком географічного меридіану та горизонтальною складовою H , що знаходиться в площині магнітного меридіану, має назву кута магнітного схилення. Величина магнітного схилення в різних точках земної поверхні різна: вона може змінюватись в залежності від місця розташування об'єкта від -180° до $+180^\circ$.

Складові які вказані вище Z , H , кути I та δ , а також модуль вектору являють собою елементи земного магнетизму. Кожен з цих елементів можна вимірювати за допомогою спеціальних приладів.

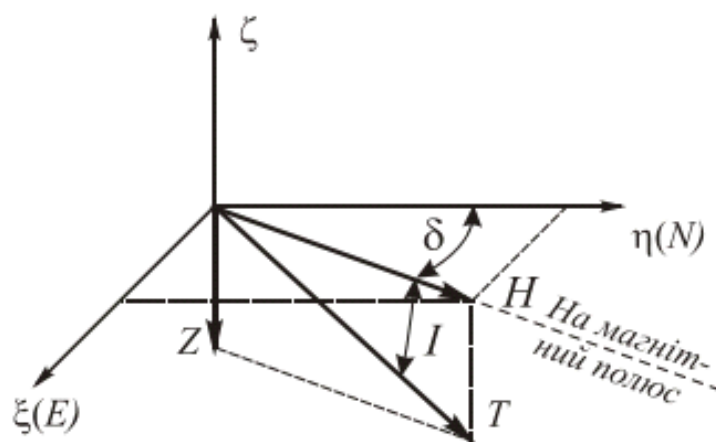


Рис. 1.1 Кут магнітного нахилення

МПЗ є слабким полем, величина його напруженості в середньому доу на земній поверхні дорівнює 40 А/м. Горизонтальна частина, яка використовується при роботі магнітних систем визначення курсу, змінюється від нуля до 32 А/м в районі екватора. Наочне уявлення про розподіл магнетизму спеціальні карти - карти елементів земного магнетизму, на яких плавними кривими (ізолініями) поєднані точки рівних значень того чи іншого

елементу. Лінії рівних значень Z , H називаються ізодинамами, лінії однакових нахилень – ізоклінами, лінії однакового схилення - ізогонами.

МПЗ (з точністю до 25%) можна вважати полем рівномірно намагніченої кулі або стрижня (диполя). Відхилення в розподілі реального МПЗ від його дипольної моделі зветься аномаліями. Існують глобальні аномалії (протяжністю в тисячі кілометрів), регіональні (десятки та сотні кілометрів) та локальні, що мають протяжність декілька кілометрів.

Магнітне поле Землі також змінюється в часі. Ці змінювання зветься магнітні варіації і поділяються на добові та вікові варіації.

Добові (які ще також зветься сонцедобовими) варіації характеризують змінювання магнітного схилення на протязі сонячної доби. Амплітуда таких змінювань може досягати $\pm 0,25^\circ$.

Вікові варіації характеризують середньорічні змінювання елементів МПЗ з року в рік. Період цих змінювань досягає кількисот років, а амплітуда, наприклад, магнітного схилення - $30...35^\circ$. Річне змінювання магнітного схилення не перевищує $\pm 0,25^\circ$.

Найбільш сильні короточасні збурення МПЗ, спричинені діяльністю Сонця, вони мають назву магнітних бур. Магнітні бурі викликають змінювання магнітного схилення в межах від одиниць градусів в середніх широтах до 50 в високих. У процемі магнітних бурь використання магнітного поля Землі в цілях орієнтації рухомого об'єкта практично неможливе. [9] Добові варіації характеризують змінювання магнітного схилення на протязі сонячної доби. Амплітуда таких змінювань може досягати $\pm 0,25^\circ$.

1.2. Визначення курсу об'єкта за допомогою МПЗ.

До головних кутів орієнтації рухомих об'єктів в горизонтальній площині в першу чергу відносять кут курсу як ми зазначили вище. В залежності від того, яка площина прийнята за початок відліку розрізняють (рис. 1.2):

- істинний курс K - кут, який відраховується від площини географічного меридіану;
- магнітний курс - кут, що відраховується від площини магнітного меридіану;
- компасний курс - кут, що відрахований від площини компасного меридіану.

Магнітний курс відрізняється від істинного курсу K на величину магнітного схилення δ , компасний курс (K_K) від магнітного курсу - на величину магнітної девіації : $= +$; $K = +\delta = ++\delta$.

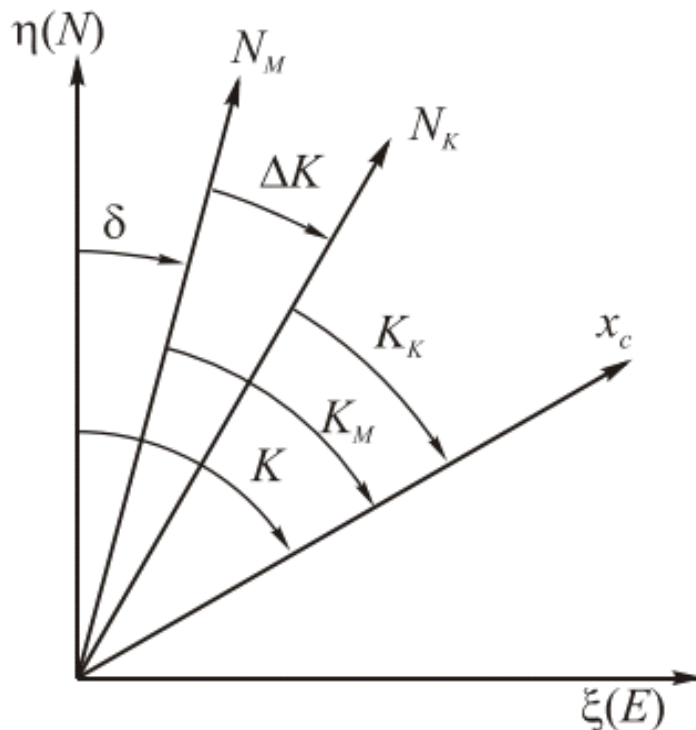


Рис.1.2. Кут курсу

Отже, вимірювання магнітного курсу(МК) зводиться до визначення кута між площиною магнітного меридіану та проекцією поздовжньої осі

основи на горизонтальну площину. Для вирішення задачі треба в першу чергу вміти визначати напрямки векторів напруженості двох полів - поля сил ваги та магнітного поля.

Вектор може бути заданий в полярній системі координат своїм модулем (полярним радіусом) та аргументом (полярним кутом) або в декартовій системі координат, де він визначається своїми проекціями на відповідні вісі. Для вирішення поставленої задачі зовсім непотрібно знати модуль вектора, достатньо знати його напрямки.

Вирішення задачі вимірювання магнітного курсу можна здійснити трьома способами:

- шляхом безпосереднього (фізичного, геометричного) моделювання напрямків цих векторів за допомогою граві- та магніточутливих пристроїв. В такому випадку інформація о величині магнітного курсу здержується шляхом безпосереднього прямого вимірювання кута між вектором та поздовжньою віссю об'єкта в змодельованій площині горизонту. Такий спосіб вимірювання магнітного курсу можна назвати геометричним;

- шляхом аналітичної обробки інформації про складові векторів напруженості магнітного поля та сили ваги в системі координат, що зв'язана з рухомим об'єктом. В даному випадку вектори та визначаються своїми проекціями на осі зв'язаної системи координат, тому для визначення курсу потрібно знати також кути нахилу об'єкта відносно площини горизонту. Використання такого способу забезпечує так зване непряме вимірювання магнітного курсу.

- шляхом геометричної побудови напрямку вектора (площини горизонту) та аналітичного визначення напрямку вектора. Такий спосіб є комбінацією двох перших, тому зветься напіваналітичним.

1.3. Магнітний компас

В теперішніх магнітних компасах площина горизонту

В теперішніх магнітних компасах площина горизонту будується з допомогою фізичного маятника, а площина магнітного меридіану, відносно якої здійснюється відлік магнітного курсу, - за допомогою сталих магнітів 1, що мають вигляд стрижнів (рис 1.3). Магніточутливий елемент 3 (картушка) може обертатися в площині горизонту навкруг своєї осі підвісу, яка завдяки фізичному маятнику зорієнтована по вертикалі. З метою збільшення спрямовуючого моменту використовують декілька магнітів (до 6), що дозволяє одержати магнітний момент в реальних конструкціях.

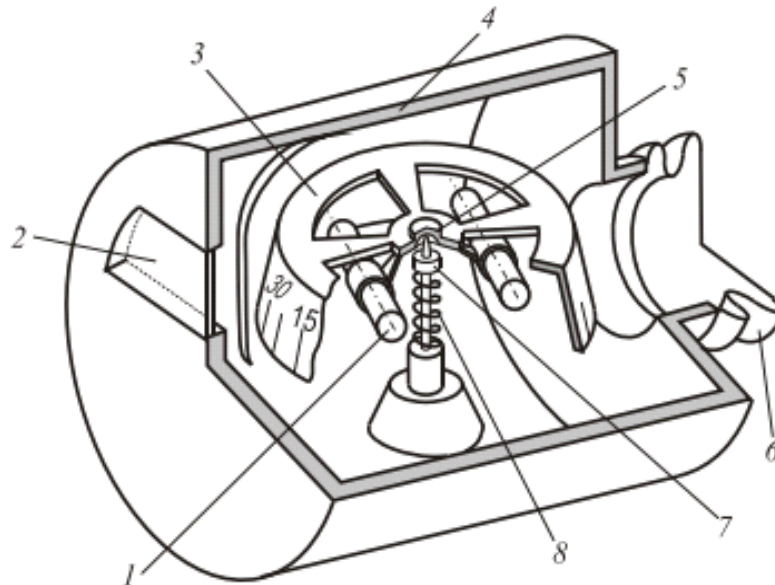


Рис.1.3. Магнітний компас

1 – магніти; 2 – оглядове вікно; 3 – картушка; 4 – корпус; 5 – топка; 6 – сільфон; 7 – шпиль; 8 – пружина.

Через спрямовуючий момент МС картушка встановлюється по напрямку вектора горизонтальної складової МПЗ. Знайдемо максимальний спрямовуючий момент, який прикладений до картушки компаса з магнітним моментом $= 1,5$, що розміщена в магнітному полі з індукцією $B = 30\text{мкТл}$. Максимальний спрямовуючий момент згідно з рис. 1.4 дорівнює:

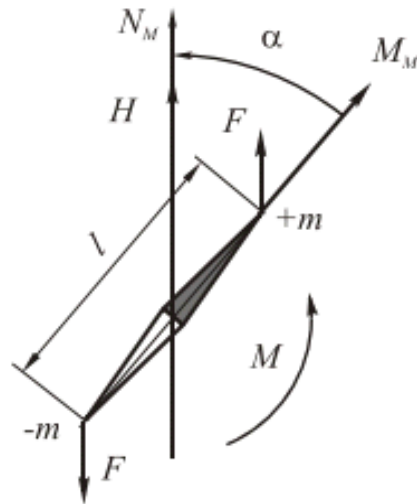


Рис.1.4. Максимальний спрямовуючий момент

Спрямовуючий момент компасу незначний, тому для одержання задовільної точності вимірювання магнітного курсу треба зробити моменти тертя в опорах підвісу картушки якомога меншими. З цією метою (рис. 1.3) використовують підвіс на кернах (шпиль 7 та топка 5): для розвантаження підвісу від дії сил ваги чутливий елемент занурюють в рідину з заданою густиною. Для амортизації картушки використовується пружина 8.

Магнітні компаси, незважаючи на своє досить довге існування, широко використовуються і зараз, особливо для вимірювання курсу суден, завдяки надзвичайній простоті конструкції, надійності, невеликій вартості, малих габаритів та ваги. Для його роботи немає потреби в електричному живленні, що є великим плюсом.

Рівняння руху магнітного компаса мають вигляд

$$I \ddot{\alpha} + f \dot{\alpha} + M_M \sin \alpha = 0, \quad (1.2)$$

де I – момент інерції картушки; f – коефіцієнт демпфірування рідини; α - кут повороту картушки відносно площини меридіану; β - кут повороту картушки відносно корпусу приладу; M_f – момент тертя в опорах підвісу картушки; M_M – магнітний момент картушки.

Для малих кутів відхилення картушки рівняння руху (1.2) набуває вигляду

де ξ - відносний коефіцієнт згасання;- частота власних незгасаючих коливань картушки. Відзначимо, що ця величина залежить від магнітної широти.

Головним недоліком магнітного компасу є значні похибки в вимірюванні курсу, що обумовлені в першу чергу неточністю фізичного моделювання напрямків векторів напруженості МПЗ та поля сил ваги.

Погрішність МК, як вимірювального приладу, розділяють на методичні та інструментальні. Розглянемо спершу фізичну сутність основних складових методичної похибки.

1. Похибка від магнітного схилення δ . Вона дорівнює куту між географічним (істинним) меридіаном та магнітним меридіаном і враховується введенням поправки на схилення δ за допомогою спеціальних карт. Для урахування цієї поправки потрібно знати місце розташування об'єкта на земній поверхні.

2. Похибка від впливу феромагнітних мас об'єкта. Феромагнітні маси та електричні контури з струмом, розміщені поблизу магнітного компаса, спотворюють картину розподілу напруженості МПЗ в зоні розташування магніточутливого елемента, що призводить до відхилення вектора напруженості від площини магнітного меридіану. Магніточутливий елемент в такому разі вимірює кут в горизонтальній площині, який вже відрізняється від магнітного курсу на величину, що складає так звану магнітну девіацію компаса ΔK .

Зменшення цієї похибки здійснюється через компенсацію викривлень магнітного поля за допомогою спеціальних девіаційних приладів. Ці прилади мають допоміжні сталі магніти та бруски "м'якого" в магнітному відношенні заліза, їх взаємне розташування можна змінювати, регулюючи тим самим їх вплив на магнітну систему компаса. Залишкову магнітну девіацію враховують за допомогою введення поправок в показ приладу.

3. Похибка з-за нахилів картушки відносно площини горизонту. Ці нахили виникають внаслідок дії на побудовувач вертикалі (фізичний маятник) збурюючих моментів, в першу чергу моментів сил інерції, що виникають при змінюванні курсу або прискореному русі об'єкта. При відхиленні фізичного маятника від вертикалі на площину картушки буде проектуватися одночасно горизонтальна та вертикальна складові МПЗ, Остання викличе відхилення магнітної системи від напрямку на північ.. Ця похибка є геометричною і властива багатьом приладам, чутливий елемент яких має три степені вільності і утримується в визначеному стані відносно базової системи координат. Тому розглянемо фізичну природу цієї похибки більш детально.

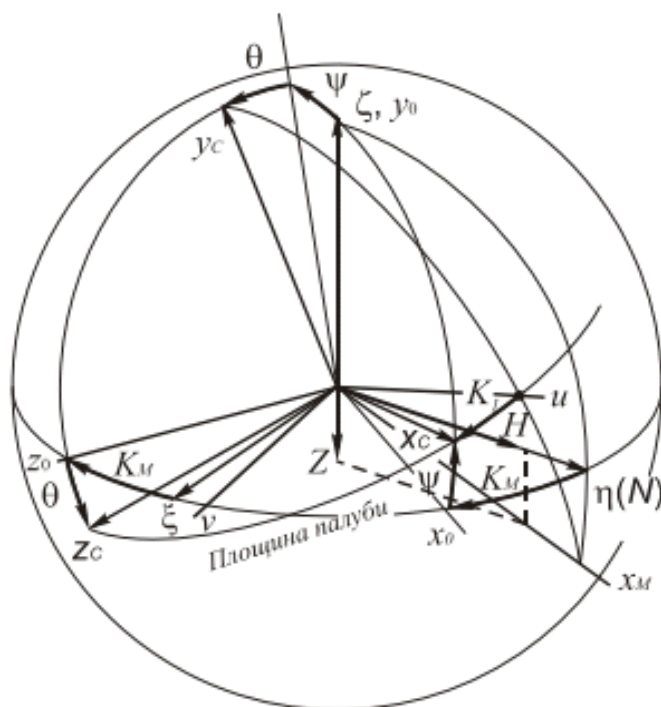


Рис.1.5. Системи координат

Уведемо такі системи координат (рис. 1.5): $\xi\eta\zeta$ -земну, зорієнтовану по магнітному меридіану (вісь η знаходиться одночасно в площині горизонту та площині магнітного меридіану); x_c, y_c, z_c - зв'язану з картушкою; x_0, y_0, z_0 - горизонтальну зв'язану, яка відповідає положенню системи x_c, y_c, z_c за умови відсутності нахилів картушки на кути θ та ψ . Вісь співпадає з напрямком повного вектора напруженості МПЗ. Істинний магнітний курс K_M

відлічується в площині горизонту між площиною магнітного меридіану $\zeta O\eta$ і вертикальною поздовжньою площиною об'єкта $\zeta O\chi_0$, а приладний K_1 - в площині картушки $xczc$ між проекцією вектора на площину $xczc$ (вісь u) та віссю xc . Різниця між цими кутами визначає шукану похибку: .

Безпосередньо з малюнка можна визначити кут K_1 :

$$\text{,} \quad (1.4.)$$

де TX та TZ - проекції вектора на осі картушки xc та zc .

Використавши замість вектора його складові та , знайдемо:

$$\text{;} \quad (1.5)$$

Після підставлення (1.5) в (1.4) одержимо:

$$\text{.} \quad (1.6)$$

Похибка в вимірюванні магнітного курсу дорівнює

$$\text{,} \quad (1.7)$$

де – кут магнітного нахилення.

Якщо рух об'єкта супроводжується великими кутами крену, похибка може досягати 180° .

Ліквідація цієї похибки можливе двома способами: шляхом примусового утримування осі обертання картушки в вертикальному, або шляхом урахування нахилів з метою подальшого обрахування необхідних поправок в покази приладу.

До інструментальних похибок магнітних компасів відносять похибки від впливу збурюючих моментів, які діють відносно осі підвісу картушки і викликають її відхилення від напрямку на північ. Серед цих моментів найбільший вплив на точність вимірювань справляють моменти сил сухого тертя MT в осях підвісу, які створюють так звану зону застою (нечутливості). Рух картушки до площини магнітного меридіану можливий тільки за умови, якщо спрямовуючий момент перебільшує момент сил сухого тертя, тому величина зони застою згідно з (1.3) дорівнюватиме:

(1.6)

Для того, щоб досягти прийнятної точності вимірювань курсу потрібно всіляко зменшувати момент тертя. Так, якщо похибка не перевищує, допустимий момент тертя за умови $M C_{\max} = 0,45$ Гсм не повинен перевищувати

Другим ваговим мотивом появи інструментальних похибок є сили в'язкого тертя, які створюються підтримуючою рідиною при змінненні курсу (тобто при обертанні корпуса приладу навкруг осі підвісу картушки). Моменти сил в'язкого тертя “захоплюють” картушку, викликаючи її відхилення від положення рівноваги. Після завершення еволюції рідина ще деякий час продовжує обертатися в корпусі, утримуючи картушку в збуреному стані.

Похибка від обертання рідини згідно з (1.3) дорівнює

(1.7)

Похибка магнітного компасу не перевищує одиниць градусів за умови ретельного виготовлення та максимального усунення методичних похибок результуюча.

1.4. Індукційні датчики магнітного курсу

Якщо використання напіваналітичного метода вимірювання курсу напрямком одного з векторів напруженості моделюють геометрично, а напрямком другого обчислюють аналітично, використовуючи для цього значення відповідних проекцій вектора на вісі зв'язаної системи координат.

З технічної точки зору, простіше за все геометрично змодельовати вектор прискорення сил ваги (тобто фізично побудувати площину горизонту). В цій площині з метою вимірювання проекцій вектора напруженості встановлюють однокомпонентні датчики магнітного поля, осі чутливості яких зорієнтовані вздовж відповідних осей об'єкта.

Через велику кількість типів таких вимірювачів для навігаційних цілей найширше застосування знайшли фероіндукційні перетворювачі або скорочено ферозонди. Тому компаси, побудовані за зазначеною схемою, одержали назву індукційних компасів.

Схема диференційного ферозонда зображена на рис. 1.6.

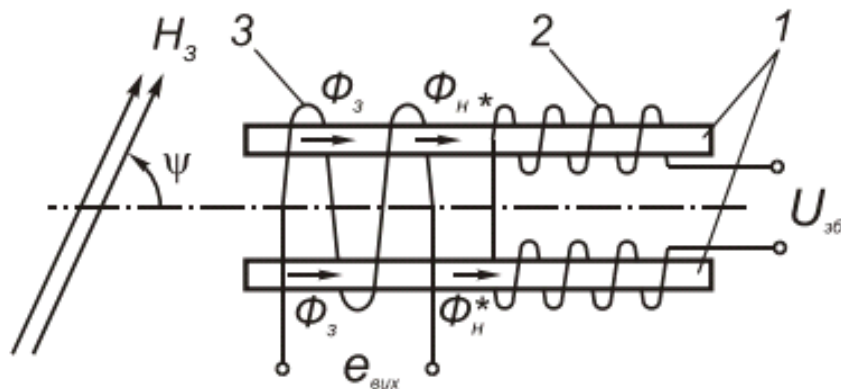


Рис.1.6. Схема диференційного ферозонда

Складається він з двох витягнутих осердь 1, виконаних з магніт-м'якого матеріалу, який легко насичується (найчастіше пермалою), двох обмоток збудження 2, які намотані на кожному осерді і мають W_3 витків кожна, а також сигнальної обмотки 3, яка охоплює обидва осердя і має W_C витків. Обмотки збудження підключені одна до одної послідовно і живляться

змінною напругою синусоїдальної форми U_3 частотою ω . Пульсуюче поле збудження викликає змінювання магнітної проникності μ^* осердь з подвійною частотою 2ω , оскільки вона є парною функцією напруженості. Тому магнітна індукція, викликана напруженістю сталого зовнішнього магнітного поля (наприклад, МПЗ) в такому осерді буде теж змінюватись з частотою 2ω . Такі зміни індукції наводять е.р.с. подвійної частоти в сигнальній обмотці. Оскільки змінювання проходить за нелінійним законом, вихідний сигнал буде мати також в своєму складі і інші парні гармоніки. Завдяки тому, що сигнальна обмотка охоплює обидва осердя (використана диференційна схема побудови вимірювача), виключена трансформація напруги живлення з обмоток збудження в вихідну обмотку.

В першому наближенні згідно з законом електромагнітної індукції Фарадея вихідну напругу U_C можна записати в вигляді

$$U_C = \dots, \quad (1.8)$$

де Φ та H - відповідно магнітний потік та напруженість вимірюваного магнітного поля, що проходить скрізь контур перетворювача; S - активна площа поперечного перерізу ферозонда; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн*- абсолютна магнітна проникливість вакууму.

Вважаючи, що похідна визначається тільки зміною напруженості H_3 збудження і від напруженості МПЗ не залежить, оскільки, вираз (6) можна записати у вигляді

$$U_C = \dots \quad (1.9)$$

де k_n – коефіцієнти гармонік.

Двезондову схему побудови найчастіше використовують серед нових розробок індукційних датчиків магнітного курсу, в якій для визначення магнітного курсу використовуються два ферозонди, магнітні осі яких за допомогою двовісного фізичного маятника встановлені в площині горизонту та спрямовані вздовж проекцій поперечної ZC та поздовжньої XC осей

об'єкта на площину горизонту (рис.1.7). Через це вихідні сигнали ферозондів $\Phi_{з1}$ та $\Phi_{з2}$ будуть дорівнювати

Двондзову схему побудови найчастіше використовують серед нових розробок індукційних датчиків магнітного курсу

(1.10)

де коефіцієнти в загальному випадку не дорівнюють один одному.

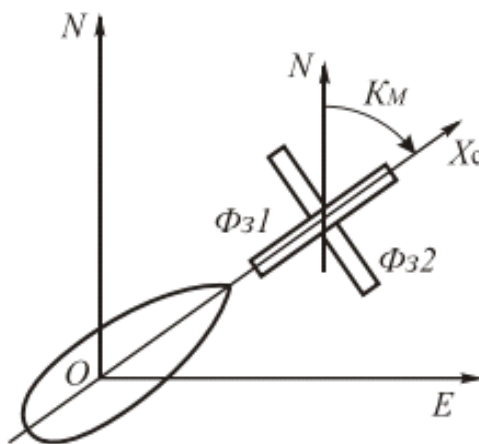


Рис.1.7 Двондзова схема побудови

З (12) з'ясуємо, що два ферозонди дозволяють одержати два сигнали змінного струму з складним парно гармонічним спектром. Амплітуди гармонік

пропорційні косинусу та синусу магнітного курсу. За умови магнітний курс можна розрахувати за допомогою співвідношення

(1.11)

Розв'язати це рівняння можна за допомогою цифрових або аналогових обчислювачів, найпростішим з яких є синусно - косинусний поворотний трансформатор, що працює в режимі побудовувача вектора по двом його ортогональним складовим (рис.1.8). За допомогою розшифруючої слідкуючої системи (РСС) такий процес може бути автоматизований.

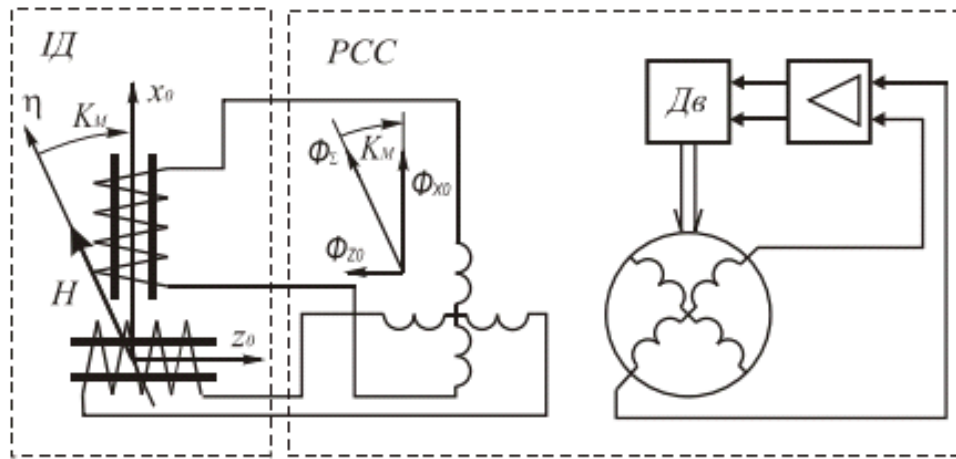


Рис.1.8. Синусно - косинусний поворотний трансформатор

Індукційний датчикомір курсу - це частина пристрою, що призначена для вимірювання складових вектора H в горизонтальній площині, а сам датчик спільно з PCC, за допомогою якої розв'язується рівняння (1.11) – індукційним компасом.

ІД призначений для вироблення електричних сигналів, що залежать від магнітного курсу. Ці сигнали поступають по електричній лінії зв'язку на статорні обмотки СКВТ PCC. Напруги в сигнальних обмотках ферозондів, які пропорційні проекціям вектора H на їхні осі чутливості, створюють в двофазній обмотці статора СКВТ струми. Сукупність цих струмів створює сумарний потік Φ , напрямком якого відтворює напрямком вектора H . За допомогою слідкуючого двигуна $Дв$, що одержує живлення з роторної обмотки СКВТ, ротор повертається до тих пір, поки магнітна вісь роторної обмотки не займе напрямком перпендикуляра до потоку Φ . Можна зробити відлік магнітного курсу, за допомогою шкали що зв'язана з ротором.

Конструкція серійного індукційного датчика ІД-6 показана на рис. 1.9.

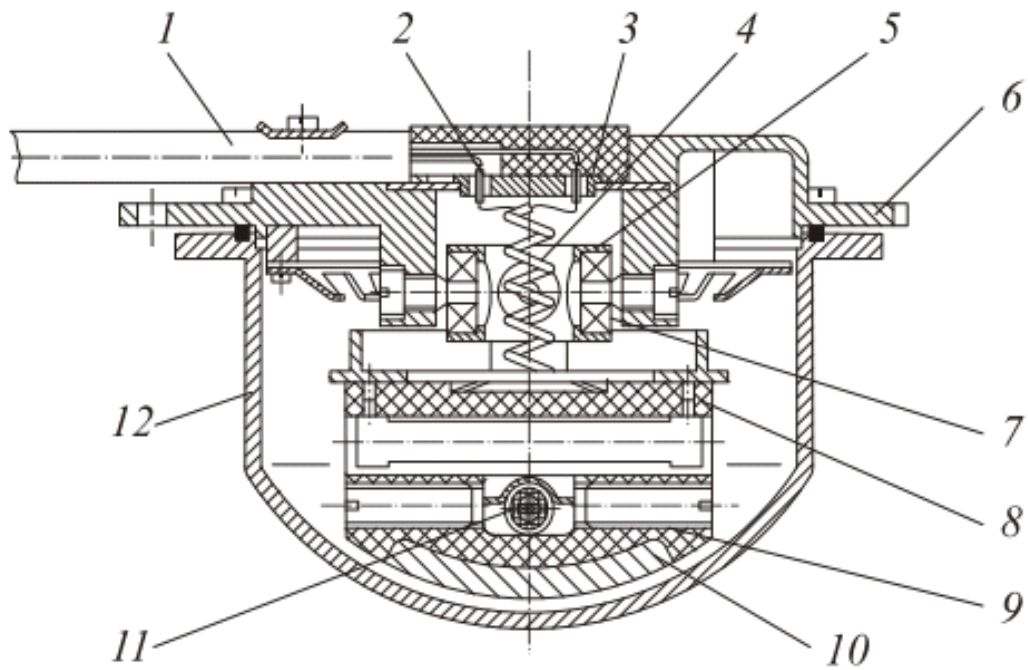


Рис.1.9. Конструкція серійного індукційного датчика ІД-6

Площадка 8 з двома ферозондами 11 закріплена в двовісному кардановому підвісі 7 і разом з вантажем 10 являє собою фізичний маятник. Для виставлення осей чутливості в площині горизонту використовуються допоміжні балансувальні гвинти 9. Корпус 12 ІД закритий герметичною кришкою 6. Герметично замкнена порожнина приладу заповнена рідиною. Електричний зв'язок з ферозондами здійснюється за допомогою джгута 1 з ізованих дротів.

Розглянута двохзондова схема відтворення вектора горизонтальної складової напруженості МПЗ не є єдиною. Так, для визначення напрямку горизонтальної складової напруженості МПЗ можна використовувати тільки один ферозонд, що працює в режимі нуль-індикатора (рис. 1.10). Вісь чутливості такого ферозонда примусово розвертають навкруг вертикальної осі до тих пір, поки його вихідний сигнал не стане дорівнювати нулю. В такому випадку кут між віссю чутливості та поздовжньою віссю об'єкта буде дорівнювати $\pm\pi/2 - KM$.

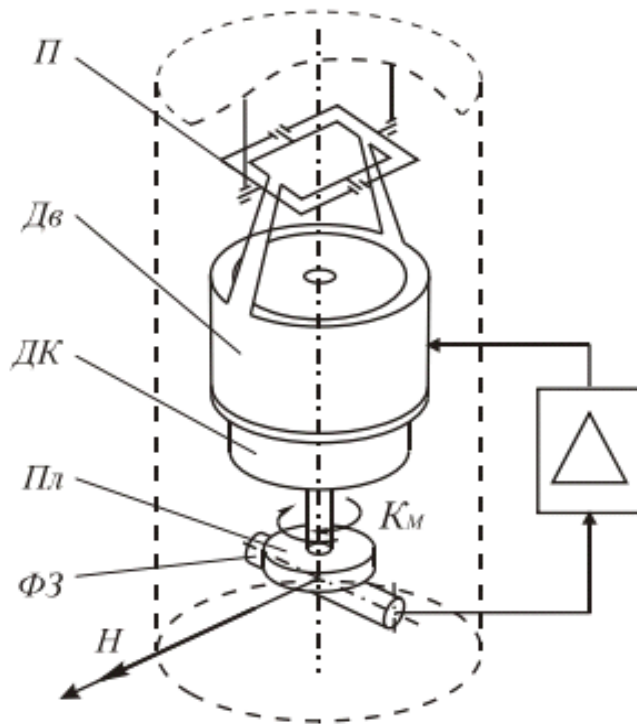


Рис.1.10. Ферозонд, що працює в режимі нуль-індикатора

У індукційних компасів ті ж самі методичні похибки, що притаманні агнітним компасам - похибки від магнітного схилення, магнітної девіації та нахилів чутливого елемента відносно площини горизонту.

В порівнянні з похибками магнітних компасів, інструментальні похибки індукційних компасів мають дещо інший характер в зв'язку з відсутністю в них механічної осі обертання чутливого елемента в площині горизонту та підтримуючої рідини. Тому вони не мають похибок, обумовлених дією моментів сил сухого та в'язкого тертя.

Найбільш суттєві інструментальні похибоки індукційних компасів:

1. Похибки розшифровуючої системи. Зменшення цієї складової провадиться методами теорії автоматичного керування та обчислювальної техніки.

2. Виробничо-технологічні похибки, які обумовлені в першу чергу неоднаковістю коефіцієнтів передачі ферозондів та магнітних властивостей їх осердь. Зменшення цієї складової похибки здійснюється в процесі складання шляхом селективного добору ферозондів з однаковими магнітними, механічними та електричними параметрами. Причиною появи

цього типу похибок можуть бути також неперпендикулярність осей чутливості ферозондів а також відхилення цих осей від площини горизонту. Похибки розшифровуючої системи. Зменшення цієї складової провадиться методами теорії автоматичного керування та обчислювальної техніки.

За умов ретельного виготовлення індукційні компаси спроможні забезпечити досить малу похибку визначення магнітного курсу - в межах одиниць та десятків кутових хвилин.

1.5. Безплатформова система визначення магнітного курсу

Вимірювальні перетворювачі які ми розглянули вище мали у своєму складі платформу (картушка в МК, платформа з ферозондами в індукційних компасах), призначену для геометричної побудови вектору сили тяжіння. В безплатформових системах реалізується аналітичний метод визначення магнітного курсу, який передбачає вимірювання проєкцій вектору напруженості магнітного поля Землі на осі зв'язаної системи координат $Ox_c y_c z_c$ та подальше перетворення одержаної інформації з урахуванням поточної величини кутів нахилу основи в сигнал магнітного курсу.

Для демонстрації сутності цього методу вимірювальних перетворень та одержання алгоритмів обчислення курсу розглянемо найпростіший варіант побудови вимірювача (рис. 1.11б), який містить три магнітometri $\Phi 31 \dots \Phi 33$, зорієнтовані по осях зв'язаної системи координат $Ox_c y_c z_c$, та обчислювача O , який реалізує задані алгоритми обчислень МК.

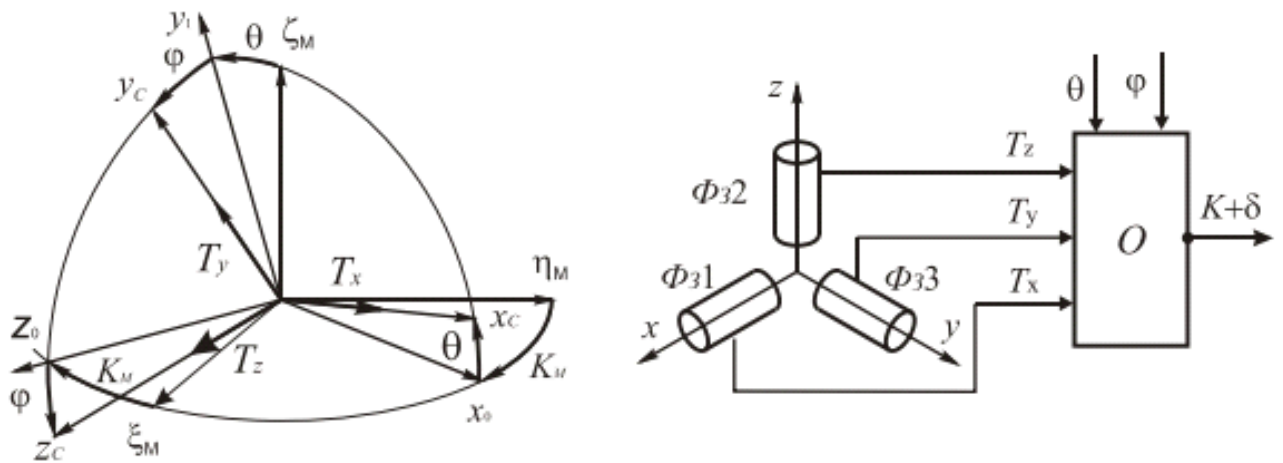


Рис.1.11. Побудова безплатформового вимірювача

На рис. 1.11а показане відносне положення: земної системи координат $O\xi_M \eta_M \zeta_M$, яка має “магнітну” орієнтацію (вісь η_M горизонтальна і знаходиться в площині магнітного меридіану), системи координат $Ox_c y_c z_c$, яка зв'язана з рухомим об'єктом, і системи координат, що відповідає положенню системи $Ox_c y_c z_c$ при нульових кутах крену θ та диференту ϕ .

Визначимо проекції вектору на горизонтальні осі та :

;

(1.12)

,

де .

Величину магнітного курсу об'єкта можна обчислити за допомогою таких алгоритмів:

(1.13)

Алгоритми перетворень (1.13) легко реалізуються аналоговим або цифровим обчислювачем.

Основні плюси аналітичного методу полягають в здатності мініатюризації вимірювальної апаратури, малих динамічних похибках, можливості одержання інформації в цифрових кодах. А головний недоліком є – високі вимоги до вимірювачів складових напруженості та кутів нахилу об'єкту. [9]

Висновок.

В даному розділі ми розглянули використання МПЗ для вирішення задач орієнтації та навігації та для визначення курсу об'єкта. Ще ми розглянули способи вимірювання магнітного курсу та класифікацію вимірювачів МК, які поділяються на: з рухомою платформою та безплатформові. Вимірювачі МК з рухомою платформою у свою чергу діляться на примітивні, індукційні та з ферозондом. А безплатформові поділяються на поляриметричні та оптоволоконні.

РОЗДІЛ 2

ПОЛЯРИМЕТРИ ТА ПОЛЯРИМЕТРІЯ

Поляриметр (полярископ, - тільки для спостереження) - це прилад, що призначений для вимірювання кута обертання площини поляризації, викликаної оптичною активністю прозорих середовищ, розчинів (сахарометра) і рідин. У широкому сенсі поляриметр - це прилад, що вимірює параметри поляризації частково поляризованого випромінювання (в цьому сенсі можуть вимірюватися параметри вектора Стокса, ступінь поляризації, параметри еліпса поляризації частково поляризованого випромінювання і т.п.).

Спочатку довідники до поляриметрії відносили і пристрої, які вимірюють ступінь поляризації. Але з введенням в дію стандарту ГОСТ 23778-79 "Вимірювання оптичні поляризаційні. Терміни та визначення" за такими пристроями закріпилася назва поляриметр.

2.1. Пристрій

Через те що існує маса різних областей застосування, конструкції поляриметрів можуть відрізнятися, але ключові елементи є однаковими.

Джерело світла - майже завжди це натрієва лампа або лампа розжарювання з тепловим екраном для захисту зразка від ІК випромінювання і матовим склом, що дає рівномірне засвічення спостерігаємої області.

Світлофільтр - це елемент, який виділяє певну область в спектрі, так як у багатьох поляриметрії використовується монохроматичне світло. Таким елементом може бути пластина з фільтруючої речовини або призма.

Двох поляризаторів розташованих по обидві сторони від аналізованого зразка / системи (часто один з них це поляроїд, а другий або поляроїд, або призма Ніколя). У випадках, коли досліджується як поляризується об'єктом природне світло, або об'єкт сильно віддалений (наприклад, в космосі), досить і одного поляризатора.

Компенсаторів - це фазові пластинки, які мають товщину зазвичай кратну чверті або половині довжини хвилі, для підбору методу вимірювань. Також існують бескомпенсаторний схеми поляриметрів, у яких з різних причин фазові пластини можуть бути відсутні. Обмеження спектру - це основна з причин відмови від компенсатора в схемі.

Вимірювальний пристрій кутового положення як поляризаторів, так і компенсатора - лімб або електронний датчик.

2.2. Саморобний полярископ

Для того, щоб спостерігати поляризацію можна використовувати лише один або два поляроїда. Ці пластини використовуються для візуалізації за допомогою рідких кристалів (зокрема в калькуляторах і ЖК-дисплеях). Одна із них поміщається перед осередками з кристалами, інша - після, а осередок з рідким кристалом повертає азимут лінії поляризації в залежності від величини прикладеного поля. Ще можна знайти у продажу поляризаційні світлофільтри для об'єктивів, які виділяють лінійну або циркулярну поляризацію. У схрещеному вигляді поляризатори з лінійною поляризацією дозволяють побачити в світлі, як змінюється поляризація прозорими середовищами. Схожий ефект можна спостерігати з послідовно встановленими поляризаторами, які мають праву і ліву циркулярну поляризацію. Для прикладу, між ними можна покласти шматочки поліетилену або пластикову лінійку. Світло, що буде проходити через атмосферу, також матиме часткову поляризацію, і її можна буде спостерігати використовуючи тільки один поляризатор. Для цього потрібно розглядати яскраві об'єкти неба (такі як хмари або місяць). Світло ЖК-дисплея також залишається частково поляризованим. Деякі люди здатні вловлювати різну поляризацію жовтого і синього випромінювання, цей ефект був відкритий австрійським фізиком Хайдінгером та був названий на його честь. Через те що, при відображенні світло також поляризується, замість поляроїда можна використовувати звичайне скло, яке затемнене з одного боку. Спостерігати джерело треба під кутом Брюстера, в цьому випадку світло практично повністю буде лінійно поляризоване.

2.3. Сутність поляриметричного аналізу (поляриметрія)

Кристалічні решітки деяких речовин мають здатність пропускати світло тільки з певним напрямком коливань. Поляризованим називають світло, що пройшло через таке середовище; воно здатне коливатися тільки в одній площині, званою площиною коливань. Площина поляризації - це площина, перпендикулярна площині коливань.

У числі відомих речовин розрізняють декілька тисяч оптично активних, тобто здатних обертати площину поляризації, проходить через них поляризованого світла.

Фундаментом методу поляриметричного аналізу є вимірювання кута обертання площини поляризації світла, яке пройшло через оптично активне середовище.

У разі якщо оптично активна речовина знаходиться в розчиненому стані, то кут повороту площини поляризації буде залежити від числа молекул речовини, що зустрічаються на шляху поляризованого променя. Чим більше число молекул, тим більше кут повороту площини поляризації. Через це, кут повороту площини поляризації залежить від концентрації оптично активної речовини в розчині.

Відстань при поляриметричних визначеннях по лінії поширення світлового променя не повинно змінюватися. Це може означати, що відстань від однієї стінки судини, в якому знаходиться оптично активна речовина, до іншої в усіх визначеннях залишається незмінною. Якщо ці умови дотриманні, кут обертання площини поляризації буде в прямій пропорційній залежності від концентрації.

Для вивчення структури і властивостей різних речовин використовують поляриметричними метод: з його допомогою проводять дослідження кристалічних речовин в мінералогії та кристалохімії, вивчають кінетику процесів, що протікають за участю оптично активних речовин, вивчають деякі параметри космічних об'єктів. Метод поляриметричного аналізу

широко застосовують в аналітичних цілях при кількісних визначеннях різних речовин.

У харчовій промисловості його успішно використовують для кількісних визначень жирів, масел, цукристих і інших речовин. Джерело поляризованих променів це основні частини будь-якого поляриметра(поляризатор) і прилад для їх дослідження (аналізатор). Призми Ніколя виконані з кристалів шпату і є дорогою частиною поляриметра. Через це в деяких пристроях замість Миколи як поляризатора і аналізатора застосовують поляроїди - плівки з герпатіта, які поміщають між двома захисними скельцями. Ефект вимірювання кута обертання площини поляризації не погіршується від такої заміни.

У випадку якщо поляризатор і аналізатор встановлені так, що їх площини поляризації взаємно паралельні, то промені світла проходять через них. При повороті аналізатора на 90° площини поляризації виявляються взаємно перпендикулярними і промені світла не проходять через аналізатор. Це відбувається тому, що промені, що пройшли через поляризатор, мають площину коливань, перпендикулярну площині пропускання променів аналізатором. Такий стан має назву установкою Миколая на «темряву».

Світлофільтр і поляроїди оптично поєднуються таким чином, що в світлі, що вийшов з поляризаційного блоку, максимум інтенсивності відповідає жовтої лінії D в спектрі натрію.

Потім поляризоване світло проходить через діафрагму з кварцовою пластиною, що відхиляє площину поляризації світла приблизно на $5-7^\circ$. При перетині поляризатора і аналізатора фотометричне поле буде помітно тільки в крайніх частинах, середня частина поля буде певною мірою висвітлена. Послабити освітленість середній частині і посилити освітленість крайніх частин фотометричного поля можна відповідним поворотом аналізатора, поле виявиться рівномірно затемненим.

Рівномірна затемненість фіксується по лімбу спочатку у відсутності трубки з досліджуваним розчином або з трубкою, наповненою водою

(нульова точка). Далі в прилад поміщають трубку з досліджуваним розчином і знову відновлюють рівномірну затемненість, повертаючи аналізатор на деякий кут. Цей кут дорівнює куту повороту площини поляризації. Кут відраховують по розподілам кругової шкали, нанесеним на лімб. Роботу на поляриметрії починають з включення лампи і пересування муфти в такий стан, при якому фотометричне поле чітко розділено на три частини. Потім встановлюють аналізатор, змінюють положення освітлювача до такої позиції, при якій поле затемнено найбільш рівномірно.

Рівномірна затемненість фіксується по лімбу спочатку у відсутності трубки з досліджуваним розчином або з трубкою, наповненою водою (нульова точка). Потім в прилад поміщають трубку з досліджуваним розчином і знову відновлюють рівномірну затемненість, повертаючи аналізатор на деякий кут. Цей кут дорівнює куту повороту площини поляризації. Кут відраховують по розподілам кругової шкали, нанесеним на лімб. Роботу на поляриметрії починають з включення лампи і пересування муфти в такий стан, при якому фотометричне поле чітко розділено на три частини. Далі встановлюють аналізатор, змінюють положення освітлювача до такої позиції, при якій поле затемнено найбільш рівномірно.

Після чого перевіряють нульове положення приладу. Для цього наповнюють трубку дистильованою водою, попередньо промивши її водою, а далі за допомогою ватного тампона - протирають спиртом. Поміщають трубку в ложі приладу, закривають шторку, встановлюють аналізатор на рівномірну затемненість і фіксують положення ноніуса. Якщо нуль ноніуса збігається з нулем лімба, то поправка дорівнює нулю. Повертаючи аналізатор поперемінно в різні боки, домагаються положення рівномірної затемнене поля і фіксують кут обертання площини поляризації. Відлік беруть кілька разів, і потім їх усереднюють.

Потім в поляриметр поміщають трубку, заповнену досліджуваним розчином, і наводять на різкість. Знаходять положення рівномірного затемнення. Відраховують по лімбу число цілих градусів від нуля нерухомою

шкали до нуля ноніуса. За ноніусом визначають десяті і соті частки градуса кута повороту.

2.4. Похибки вимірювальних приладів

Якість передавання інформації вимірювальними перетворювачами та складеними з них вимірювальними приладами та системами орієнтації, навігації та керування рухом (СОНКР) , а також якість результатів вимірювань характеризують не точністю, а, навпаки, величиною допущених похибок. Оскільки прояв похибок приладів дуже різноманітний, то похибки класифікують на різновиди по цілому ряду ознак.

Методичні та інструментальні похибки. Інструментальні похибки виникають із-за недостатньо високої якості виготовлення елементів перетворювача (приладу або системи). Так, скажімо, в механічному гіроскопі момент тертя в опорах підвісу викликає дрейф (відхилення з сталою швидкістю) або зону нечутливості. Цей момент залежить від умов експлуатації приладу (температури, тиску оточуючого середовища та ін.). тобто в багатьох випадках є неконтрольованою величиною.

Однак є похибки, які будуть залишатися навіть в тому випадку, коли виготовлення окремих деталей та вузлів приладу є ідеальним. Для більшості триступеневих гіроскопічних приладів це є похибки, які пов'язані з тим, що вимірювання проводиться в системах координат, які обертаються в інерціальному просторі. В двоступеневих гіроскопічних тахометрах кут повороту рамки залежить не тільки від гіроскопічного моменту, який несе інформацію про кутову швидкість обертання основи навкруг осі чутливості, але і від моментів сил інерції обертального та доцентрового прискорень обертання основи навкруг осі чутливості. Ця обставина створює похибки самого методу вимірювань, тобто методичні похибки.

Тому, причина виникнення методичних похибок є те, що ми свідомо вимірюємо, перетворюємо або використовуємо на виході перетворювача не ту величину, яка потрібна нам, а іншу, яка відображає потрібну лише приблизно, але значно легше реалізується. Такий шлях заміни того, що потрібно, тим, що дещо гірше, але простіше, дуже широко використовується

в приладобудуванні і дозволяє створювати найпростіші, дешеві та надійні прилади.

Систематичні та випадкові похибки. Систематичні - це похибки, які не змінюються в часі або є незмінними в часі функціями окремих параметрів. Головна властивість систематичних похибок це здатність бути майже повністю усунутими введенням відповідних виправлень. Прикладом таких похибок є конструктивна похибка гірокомпаса, яка виникає як наслідок використання системи згасання коливань і залежить від географічної широти місця розташування основи.

Випадкові - невизначені за величиною або недостатньо вивчені похибки, в появі різних значень яких не вдається встановити визначену закономірність. Їх частинні значення не можуть бути передбачені, а для всієї сукупності може бути встановлена закономірність лише для частот появи їх різних значень. В переважній більшості випадків процес появи випадкових похибок є стаціонарний випадковий процес, тому різноманіття величин таких похибок характеризують визначенням закону розподілу їх вірогідності або параметрів такого закону.

Абсолютна, відносна та приведена похибки. Похибка вимірювального перетворювача або приладу являє собою відхилення його реальної функції перетворення (рис. 2.1) від номінальної. Ці відхилення, які відлічуються вздовж осі x або осі y , тобто різниці типу або є абсолютними похибками перетворення, виражені в одиницях величин X та Y .

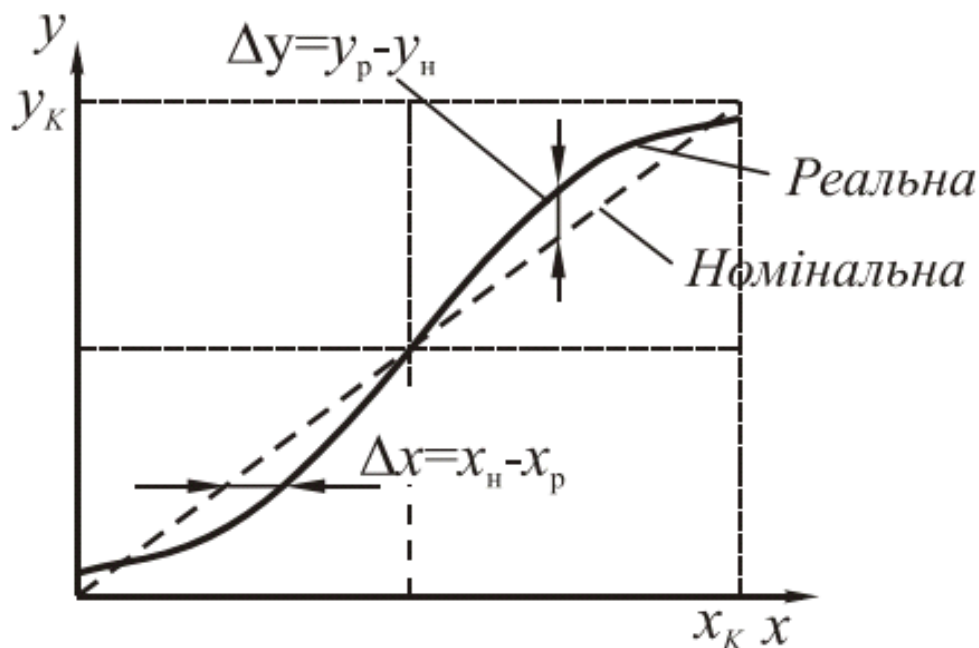


Рис. 2.1. Функція перетворення

Але абсолютна похибка не може мірою точності, тому що вона не відображає її частку в вимірюваній величині. Тому вводиться поняття відносної похибки, яку виражають в відсотках вимірюваної величини. Але внаслідок змінювання значень x та y вздовж шкали приладу поточне значення відносної похибки γ не залишається сталим, а, навпаки, стає різним для різних значень вимірюваної величини. Для нульового значення x вона стає нескінченною. Внаслідок цього вводиться ще одне специфічне поняття – поняття приведеної похибки, яка дорівнює $\gamma \cdot x$. По суті вона є абсолютною похибкою, що визначається в відсотках.

Статичні та динамічні похибки. Ці похибки відрізняють по їх залежності від швидкості змінювання вимірюваної величини в часі. Похибки, що не залежать від цієї швидкості, називають статичними. Похибки, яких немає при нульовій швидкості, але які зростають при відхиленні швидкості від нуля, називаються динамічними.

Висновок.

Даний розділ розкриває в собі сутність поляриметра та поляриметричного аналізу. Також досліджено класифікацію та зроблено аналіз похибок, що виникають у вимірювальних приладах під час роботи.

РОЗДІЛ 3

ОБЕРТАННЯ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ. ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА

3.1. Магнітом'які високочастотні матеріали

Високочастотні магнітом'які матеріали - це речовини, які повинні виконувати функції магнетиків при частотах понад декілька сотень або тисяч герц. За частотою діапазону застосування їх в свою чергу можна поділити на матеріали для звукових, ультразвукових і низьких радіочастот, для високих радіочастот та для СВЧ.

За фізичною природою і будовою високочастотні магнітом'які матеріали поділяють на магнітоелектрики та ферити. До того ж, при звукових, ультразвукових і низьких радіочастотах використовують тонколистові рулонні холоднокатані електротехнічні сталі і пермаллой. Товщина сталей сягає 30-25 мкм, а пермаллой, як механічно більш м'який сплав, може бути отриманий товщиною до 2-3 мкм. Основні магнітні властивості таких тонких магнітних матеріалів близькі до властивостей матеріалів великих товщин, проте вони мають дещо підвищену коерцитивну силу і високу вартість, а технологія збірки магнітних кіл з них досить складна.

Ферити являють собою оксидні магнітні матеріали, у яких спонтанна намагніченість доменів обумовлена некомпенсованих антиферомагнетизмом.

Великий питомий опір, що перевищує питомий опір заліза в 10³-10¹³ разів, і відносно незначні втрати енергії в області підвищених і високих частот поряд з досить високими магнітними властивостями забезпечують фериту широке застосування в радіоелектроніці.

В багатьох випадках магнітом'які ферити з початковою магнітною проникністю 400 - 20 000 в слабких полях ефективно замінюють листові феромагнітні матеріали - пермаллой і електротехнічну сталь. У середніх і сильних магнітних полях заміна листових феромагнетиків ферритами недоцільна, оскільки у феритів менше індукція насичення.

Магнітом'які ферити широко застосовуються в якості сердечників контурних котушок постійної і змінної індуктивностей, фільтрів в апаратурі радіо і дротового зв'язку, сердечників імпульсних і широкосмугових трансформаторів, трансформаторів розгортки телевізорів, магнітних модуляторів і підсилювачів. З них виготовляють також стрижневі магнітні антени, індуктивні лінії затримки та інші деталі й вузли електронної апаратури.

Частіше за все використовують ферритові сердечники із замкнутою магнітною ланцюгом. Вони існують або монолітними, у вигляді єдиного тіла, або складовими - з двох добре пришліфованою один до одного частин, зазор між якими по можливості малий.

Складові магнітопроводи використовуються частіше монолітних, так як з намотуванням дроту на останні викликають певні труднощі.

Сьогодні пристрої зв'язку використовують багато деталей з феритовими сердечниками. Ферити задовольняють серйозним вимогам, що пред'являються до сучасних елементів пристроїв зв'язку, а також знаходять собі інші застосування. Це, наприклад, ферритові антени, односпрямовані ізолятори хвилеводів, модулятори мікрохвиль і т.д. Можливість виготовлення феритів різного складу збільшує можливості їх застосування, через це, ферити переступили межі області застосування, для якої вони були спочатку розроблені, і стали застосовуватися в техніці ЕОМ, в техніці регулювання вимірювань, а також в атомній техніці.

3.2. Поздовжній магнітооптичний ефект Фарадея.

Поздовжній магнітооптичний ефект полягає в повороті площини поляризації променя світла, що проходить через прозоре середовище, що знаходиться в магнітному полі. Цей ефект був відкритий в 1846 році. Відкриття магнітооптичного ефекту довгий час мало значення в чисто фізичному аспекті, але за останні десятиліття воно дало багато практичних виходів. Також були відкриті інші магнітооптичні ефекти, зокрема, добре відомий ефект Зеємана і ефект Керра, що виявляється в повороті площини поляризації променя, відбитого від намагніченого середовища. Наш інтерес до ефектів Фарадея і Керра обумовлений їх застосуванням у фізиці, оптиці і електроніці. До них відносяться:

- Визначення ефективної маси носіїв заряду або їх щільності в напівпровідниках;
- Амплітудна модуляція лазерного випромінювання для оптичних ліній зв'язку та визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках;
- виготовлення оптичних невзаємних елементів;
- Візуалізація доменів в феромагнітних плівках;
- Магнітооптична запис і відтворення інформації як у спеціальних, так і побутових цілях.

Рис. 3.1. Схема спостереження ефекту Фарадея.

Принципова схема пристрою для спостереження і багатьох застосувань ефекту Фарадея показана на рис. 3.1. Схема складається з джерела світла, поляризатора, аналізатора і фотоприймача.

Тим поляризатором і аналізатором поміщається досліджуваний зразок. Кут повороту площини поляризації відлічується за кутом повороту

аналізатора до відновлення повного гасіння світла при включеному магнітному полі.

Інтенсивність минулого пучка визначається законом Малюса

(3.1)

На цьому заснована можливість використання ефекту Фарадея для модуляції пучків світла. Основний закон, що впливає з вимірів кута повороту площини поляризації, виражається формулою:

, (3.2)

де H - Напруженість магнітного поля, l - довжина зразка, яка повністю знаходиться в полі і, V - Постійна Верде, яка містить в собі інформацію про властивості, властивих досліджуваному зразку, і може бути виражена через мікроскопічні параметри середовища.

Основна особливість магнітооптичного ефекту Фарадея полягає в його невзаємності, тобто порушення принципу оборотності світлового пучка. Досвід показує, що зміна напрямку світлового пучка на зворотне / на шляху "назад" /

багаторазовому проходженні пучка між поляризатором і аналізатором ефект накопичується. Зміна напрямку магнітного поля, навпаки, змінює напрямок обертання на протилежне. Ці властивості об'єднуються в понятті "гіротропних середу".

3.3. Спосіб реєстрації кута обертання площини поляризації світлового променя з використанням оптично прозорих феромагнітних кристалів.

Першими хто запропонував модуляційний спосіб реєстрації кута обертання площини поляризації світлового променя, були Кудрявцевим В. І. Згодом Кудрявцевим В. І. і Кеймахом Р. Я. був описаний фотополяриметр, що реалізує цей спосіб реєстрації, з автоматичною слідкуючою системою, чутливість якого досягала 0,01 град. Далі схема фотополяриметра зазнавала змін(модифікацій), але принцип реєстрації кута повороту площини поляризації світлового променя зберігся незмінним. У якості джерела випромінювання використовувався He-Ne лазер, це дозволило підвищити чутливість вимірювань до 10^{-4} град. Потім був запропонований фотополяриметрз автоматичним зворотнім зв'язком, керованим комп'ютером, точність якого складала 10^{-3} град. В оптичний канал ввели другу комірку Фарадея і запропонована більш досконала методика вимірювань, це дозволило підняти чутливість до 10^{-6} град. Незважаючи на високу чутливість, модуляційні фотополяриметри поступаються за абсолютною точністю у вимірюванні кута поворотуплощини поляризації класичним і оптимізованим класичним фотополяриметрам.

Парамагнітні кристали які використовуванні в модуляційних поляриметрах мають невеликий поворот площини поляризації (± 1 градус) при керуючих магнітних полях близько $80 \cdot 10^3$ А/м, для створення яких використовуються потужні підмагнічувальні соленоїди, які мають велику постійну часу.

Такі фотополяриметри мають високу чутливість, є інерційними, енергоємними і мають великі розміри, тому можуть бути використані переважно в лабораторних умовах. Висока чутливість досягається лише в оптичному каналі з незначною деполіризацією променя, що проходить крізь нього.

Цікавим дослідженням є характеристики модуляційного фотополяриметра з оптично прозорим феримагнетиком у ролі активного елемента комірки Фарадея, в якому поворот площини поляризації доходить до 100 градусів при магнітних полях близько 80 А/м. У приладовому виконанні такі фотополяриметри малогабаритні, малопотужні, та мають високу швидкодію.

Далі у цій роботі продовжено дослідження властивостей фотополяриметра з оптично прозорим феримагнітним кристалом. При цьому враховується вплив на якість оптичного каналу не лише поляризаційних призм, але й досліджуваного мутного середовища, а також комірки Фарадея.

[5]

3.3.1. Розрахунок параметрів поляриметра.

Цей фотополяриметр заздалегідь налаштовується безактивного зразка до зникнення сигналу на виході. Зразок повертає площину поляризації, це призводить до появи сигналу, який компенсується шляхом довертання аналізатора на певний кут. Це і є шуканий кут φ , на який активний зразок повернув площину поляризації променя.

Розрахунок параметрів будемо проводити за допомогою методу вектора Стокса і матриць Мюллера. Для променя світла, який пройшов через фотополяриметр, вектор Стокса визначається виразом:

$$(V_e)P_R = [P_A][P_{FK}][P_{ZR}][P_{POL}](V_i), \quad (3.3)$$

де $(V_i) = (I_0 \ 0 \ 0 \ 0)$ – вектор Стокса падаючого променя;

I_0 – інтенсивність світлового потоку на вході системи;

$[P_A]$, $[P_{FK}]$, $[P_{ZR}]$, $[P_{POL}]$ – відповідно матриці, що описують властивості аналізатора, комірки Фарадея, мутного зразка та поляризатора .

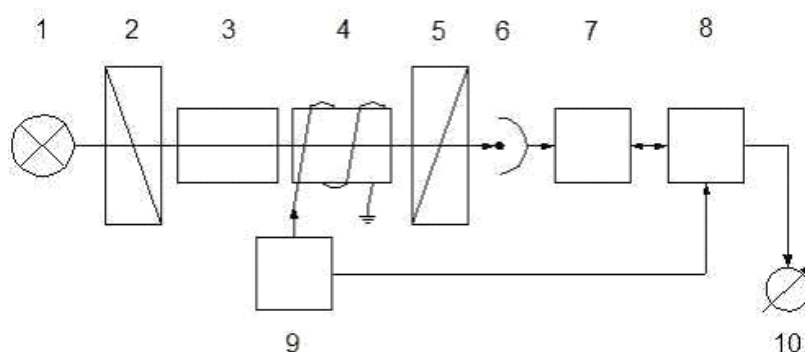


Рис. 3.2. Блок-схема фотополяриметра:

1 – джерело світла; 2 – поляризатор; 3 – мутне активне середовище; 4 – комірка Фарадея; 5 – аналізатор; 6 – фотоприймач; 7 – підсилювач; 8 – синхронний детектор; 9 – звуковий генератор; 10 – мікроамперметр (індикатор)

Напрями намагніченості в кожному домені феримагнетика розташовані довільно (рис. 3.3, а), через це, стан поляризації по поперечному перетину постійний лише в області, сумірній з розміром домену. Дійсно стан поляризації змінюється в кожній точці, оскільки світловий промінь в кристалі

феримагнетика проходить декілька доменів. При підсумовуванні світлового потоку по всьому поперечному перетину на виході феримагнетика промінь буде деполаризованим. Однак, в кожній точці поперечного перетину кристала світло поляризоване. Розсіюванням променя на доменах можна знехтувати, тому що зміна показника заломлення Δn на їх межі не перевищує 10^{-5} , тобто геометрична форма променя залишається.

Зі збільшенням зовнішнього магнітного поля буде збільшуватись розмір доменів, намагніченість яких направлена уздовж нього. При досягненні полів насичення доменна структура зникає, однак намагніченість кристала буде неоднорідною (рис. 3.3, б). Тільки кристали у формі сфери і еліпсоїда обертання будуть однорідно намагнічені в полях насичення і, отже, у них деполаризація променя буде мінімальною.

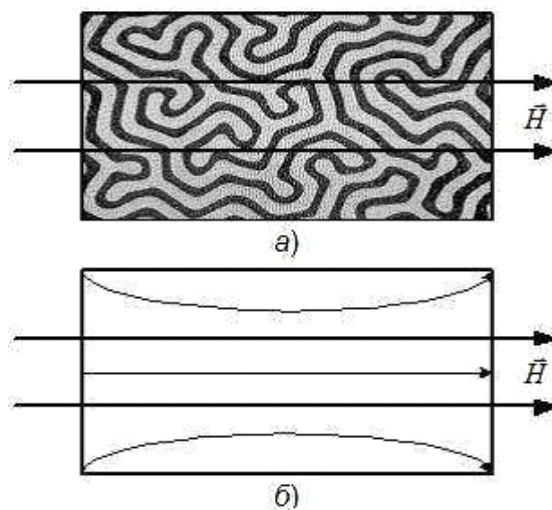


Рис. 3.3. До пояснення доменної структури феримагнетика:

а – доменна структура феримагнітного кристала в магнітних полях, значно менших поля насичення ; б – домена структура феримагнітного кристала в магнітних полях порівнянних і перевершуючих поля насичення

Щоб дослідити вплив доменної структури кристала на світловий промінь, що проходить крізь нього, за аналогією з головними пропусканнями поляризаційних призм (k_1 , k_2) введемо узагальнені параметри $k'_1 k'_2$ – найбільше і найменше головні пропускання оптичного каналу відповідно.

Параметр k'_1 вимірювався при розташуванні аналізатора на максимумі, а k'_2 – на мінімум пропускання світла. Вираз для ступеня поляризації світла в оптичному каналі буде мати вигляд:

$$p' = \frac{k'_1 - k'_2}{k'_1 + k'_2} = 1 - 2Gd', \quad (3.4)$$

На рис. 3.4 показані графіки залежності повороту площини поляризації φ , найбільшого k'_1 і найменшого k'_2 головних пропускань, ступеня поляризації світла p' оптичного каналу від керуючого магнітного поля, що подається на кристал ітрій-галієвого фериту-гранату. При вимірюваннях застосовувалися поляризаційні призми високої якості, внаслідок чого оцінювався деполаризуючий вплив лише доменної структури феримагнетика.

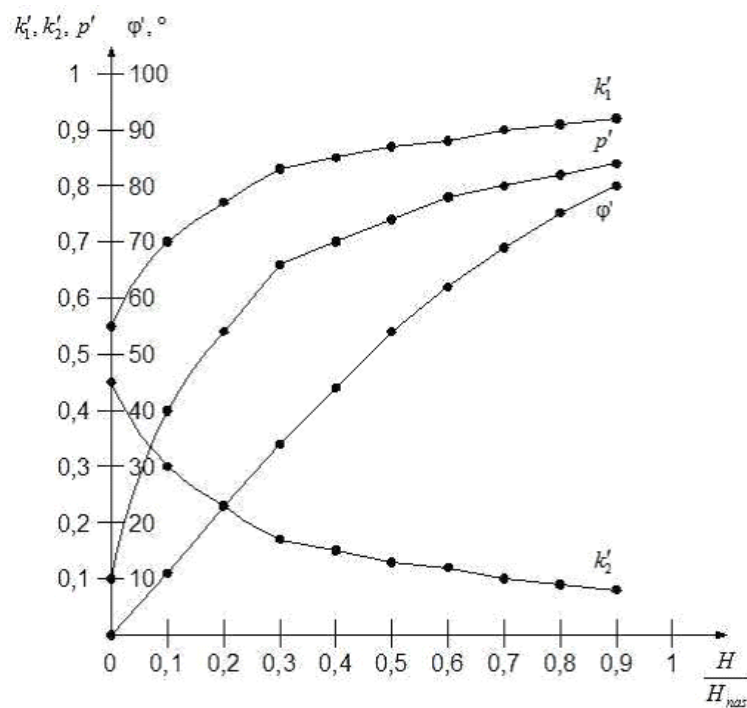


Рис. 3.4. Графіки залежностей

$$\varphi' \left(\frac{H}{H_{nas}} \right), k'_1 \left(\frac{H}{H_{nas}} \right), k'_2 \left(\frac{H}{H_{nas}} \right), p' \left(\frac{H}{H_{nas}} \right) \quad (3.5)$$

З рис. 3.4 видно, що k'_1 збільшується, а k'_2 зменшується із збільшенням керуючого магнітного поля, через феримагнетик якій стає однорідним по намагніченості і деполяризація світла в ньому знижується. Ступінь поляризації із збільшенням керуючого магнітного поля зростає і при полях, близьких до полів насичення, дорівнює 0,8, але одиниці не досягає, оскільки навіть в полях насичення намагніченість кристала по поперечному перетину неоднорідна.

Аналогічно з матрицею оптично активного розсіюючого середовища, матрицю комірки Фарадея з оптично прозорим феримагнітним кристалом у ролі активного елемента можна записати у вигляді:

$$[P_{FK}] = (1 - R_1)^2 e^{-\gamma z} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p' \cos 2(\theta_+ + \theta) & -p' \sin 2(\theta_+ + \theta) & 0 \\ 0 & p' \sin 2(\theta_+ + \theta) & p' \cos 2(\theta_+ + \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p' \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

де R_1 , γ , z – відповідно коефіцієнти відбиття і поглинання світла коміркою Фарадея та її товщина; θ_+ – додатковий кут повороту площини поляризації світла, пов'язаний з геометричними дефектами, залишковою намагніченістю феримагнетика; θ – кутова амплітуда коливань площини поляризації, що змінюється за періодичним законом: $\theta = \theta_0 \Phi(t)$, де $\Phi(t)$ – довільна періодична функція, що змінюється в часі з частотою ω .

З (3.6) визначимо інтенсивність світлового променя (першу компоненту вектора Стокса), який пройшов через систему:

$$I = \frac{I_0}{4} (1 - R_1)^2 e^{-\gamma z} \times [(k_1 + k_2)^2 - (k_1 - k_2)^2 p p' \cos 2(\beta - \varphi + \theta + \theta_+)], \quad (3.7)$$

де p – ступінь поляризації світла в досліджуваній речовині; k_1, k_2 – головні значення пропускання поляризаційних призм; β – азимут площини найбільшого пропускання аналізатора.

При вимірюваннях площина найбільшого пропускання аналізатора і площина поляризації падаючого на нього світла, яке пройшло досліджуваний зразок, взаємно перпендикулярні з точністю до чутливості експерименту Δ :

$$\beta - \varphi + \theta_{=} = \frac{\pi}{2} + \Delta \quad (3.8)$$

Тоді вираз (3.9) набере вигляду:

$$I = \frac{I_0}{4}(1 - R_1)^2 e^{-\gamma z} (k_1 + k_2)^2 \times \\ \times [1 - (1 - 2Gd)^2 pp' \cos 2\theta + 2\Delta(1 - 2Gd)^2 pp' \sin 2\theta], \quad (3.9)$$

Вираз для інтенсивності на виході фотополяриметра співпадає, якщо відсутня доменна структура комірки Фарадея і її намагніченість однорідна, а досліджуваний зразок не деполаризує світло ($p = p' = 1$).

Розрахуємо ступінь поляризації світла P , що пройшло через оптичну систему:

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} = (1 - 2Gd)^2 pp', \quad (3.10)$$

де I_{\parallel} і I_{\perp} – відповідно інтенсивності світла, що пройшло через пару поляризаторів при взаємно паралельному і взаємно перпендикулярному їх поляризуючих напрямів.

За формулою (3.10), P для нашого випадку залежить від властивостей поляризаторів (параметр Gd), комірки Фарадея (ступінь поляризації світла в оптично прозорому феримагнітному кристалі p') та мутного середовища (ступінь поляризації світла в досліджуваній речовині p), тобто від властивостей оптичної системи в цілому. Слід відзначити, що формула (3.10) справедлива лише для частково лінійно поляризованого випромінювання.

Визначимо відношення сигнал-шум для даної системи. Вважаємо, що у якості модулюючих на комірку Фарадея подаються сигнали прямокутної форми. При модуляції прямокутними сигналами p' максимальний за період модуляції.

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{U_C^2}{U_T^2 + U_D^2} = \\ &= \frac{A_1 A^2 \Delta^2 4 (k_1 + k_2)^4 (1 - 2Gd)^4 p^2 p'^2 \sin^2 2\theta_0}{U_T^2 + A_2 A (k_1 + k_2)^2 [1 - (1 - 2Gd)^2 p p' \cos 2\theta_0]}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

Шляхом перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= A' \Delta^2 (k_1 + k_2)^2 \times \\ &\times \frac{4(1 - 2Gd)^4 p^2 p'^2 \sin^2 2\theta_0}{\frac{U_T^2}{A_2 A (k_1 + k_2)^2} + 1 - (1 - 2Gd)^2 p p' \cos 2\theta_0}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

Підставимо вираз для Р з (3.12) у відношення сигнал-шум (3.13):

$$\frac{S}{N} = A' \Delta^2 (k_1 + k_2)^2 \frac{4P^2 \sin^2 2\theta_0}{\frac{U_T^2}{A_2 A (k_1 + k_2)^2} + 1 - P \cos 2\theta_0}. \quad (3.13)$$

На рис. 3.5 зображені криві залежності відношення сигнал-шум від кута розгойдування для різних значень ступеня поляризації світла в оптичному каналі. Тут і надалі у розрахунках були прийняті наступні значення параметрів: $A = 5 \cdot 10^{-3}$; $A_1 = 2 \cdot 10^{13}$; $A_2 = 2 \cdot 10^{-6}$; $I_0 = 20$ мВт; $U_T = 0,2$ мкВ. Крива 1 побудована для ідеального недеполяризуючого оптичного каналу з $P=1$.

Криві 2 - 4 побудовані з урахуванням впливу поляризаційних призм та мутного активного середовища при $k_1=0,7$; $k_2=0,01$; $p'=1$. Крива 5 побудована без урахування впливу поляризаційних призм та мутного активного середовища, причому ступінь поляризації Р у кожній точці змінюється зі зміною кута розгойдування та відповідно p' . Крива 6 побудована з урахуванням впливу всіх елементів оптичного каналу при $k_1=0,7$; $k_2=0,01$; $p' = 0,9$, причому ступінь поляризації Р у кожній точці змінюється зі зміною кута розгойдування та відповідно p' .

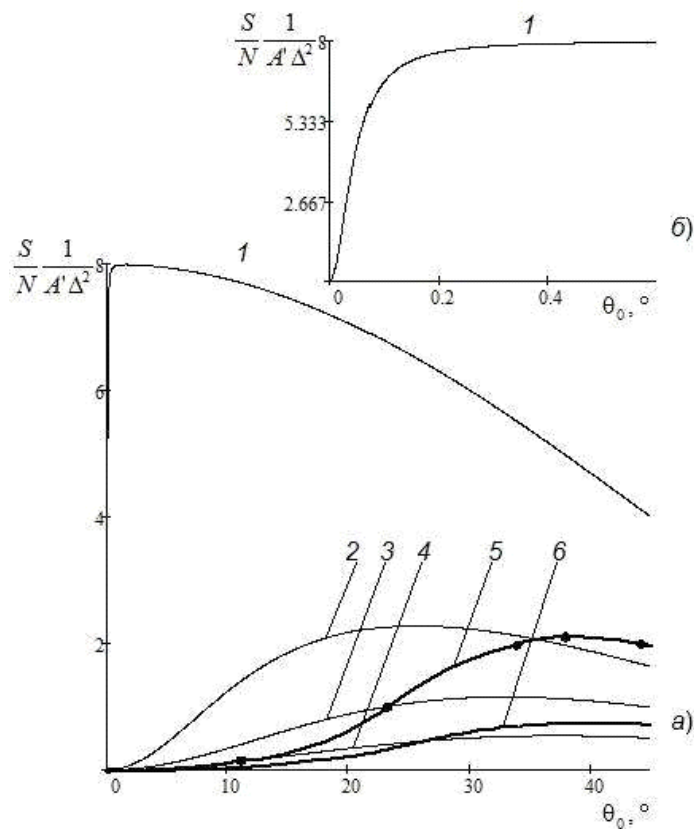


Рис. 3.5. Залежність S/N.

З рис. 3.5 видно, що залежність відношення сигнал-шум від кута розгойдування проходить через максимум.

Кути розгойдування, що відповідають максимальному значенню S/N, називають оптимальними. На рис. 3.5 (б) зображена залежність відношення сигнал-шум від значення кута розгойдування при $P=1$ в зоні малих θ_0 .

При $P=1$ крива залежності $S/N(\theta_0)$ виходить з початку координат і проходить через максимум, що не було відмічено в попередньому дослідженні. Це пов'язано з тим, що в даній роботі враховувалися теплові шуми, які хоч і невеликі, але впливають на значення відношення сигнал-шум в області малих кутів розгойдування, тоді як дробові шуми зводяться практично до нуля через відсутність деполаризації світлового променя. З рис. 3.5 (а) видно, що при зменшенні P , тобто погіршенні якості оптичного каналу, оптимальні кути розгойдування збільшуються, а максимальні значення S/N, що відповідають цим кутам, зменшуються.

З рис. 3.5 (а) видно, що комірка Фарадея на ітрій-галієвому фериті-гранаті істотно деполаризує світловий промінь, що проходить крізь неї, проте при цьому відношення сигнал-шум і відповідно чутливість зменшується лише в 4 рази в порівнянні з повністю недеполаризуючою оптичною системою (крива 5).

Криві 2 і 5 на рис. 3.5 мають практично однакові значення максимуму залежності $S/N(\theta_0)$, однак оптимальний кут розгойдування кривої 5 в два рази перевищує оптимальний кут кривої 2. Це результат впливу доменної структури оптично прозорого феримагнетика, яка при малих магнітних полях значно деполаризує світловий промінь, що проходить крізь нього. Отже, вплив доменної структури аналогічно розсіюванню світла в оптичному каналі з $P=0,9$.

Кут розбалансування. Мінімальний кут розбалансування визначається з умови відношення сигнал-шум дорівнює одиниці згідно з виразом (3.14), буде дорівнювати:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1 + \frac{U_T^2}{A_2 A (k_1 + k_2)^2} + 1 - P \cos 2\theta_0}{A' (k_1 + k_2)^2 4P^2 \sin^2 2\theta_0}}. \quad (3.14)$$

Теоретичні криві на рис. 3.6 показують залежність кута розбалансування, тобто чутливості системи, від ступеня поляризації світла в оптичному каналі P при різних, у тому числі при оптимальному, значеннях кута розгойдування θ_0 . При розрахунках були прийняті наступні значення параметрів: $k_1=0,7$; $k_2=0,01$ (варто зазначити, що при $P=1$ $k_1=1$ та $k_2=0$).

З графіка видно, що при малих P спостерігається різка залежність чутливості системи від параметра θ_0 . При зменшенні кута розгойдування чутливість погіршується і її максимум зміщується у бік великих значень параметра P . При оптимальному ж куті розгойдування чутливість фотополариметра максимальна для даного P . Причому оптимальний кут розгойдування свій для кожного значення P . [5]

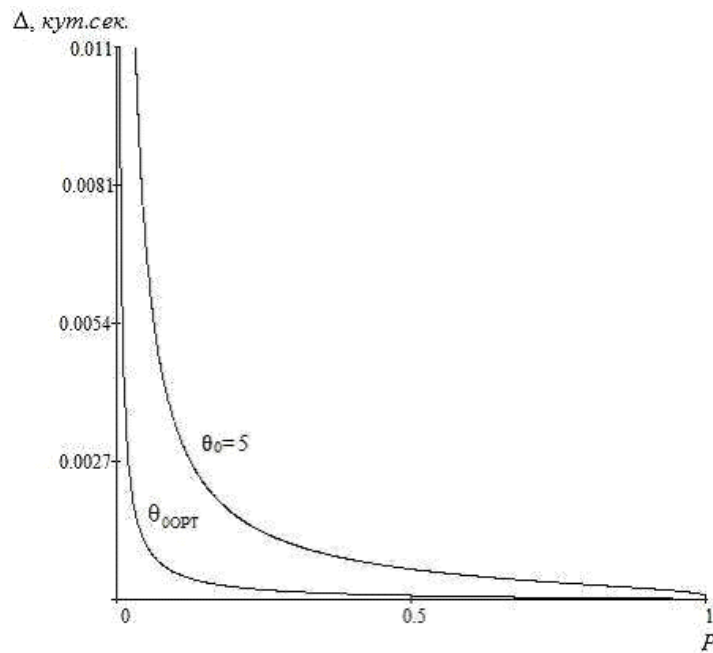


Рис. 3.6. Залежність чутливості системи $\Delta(P)$

3.4. Датчики на основі поляризованого світла

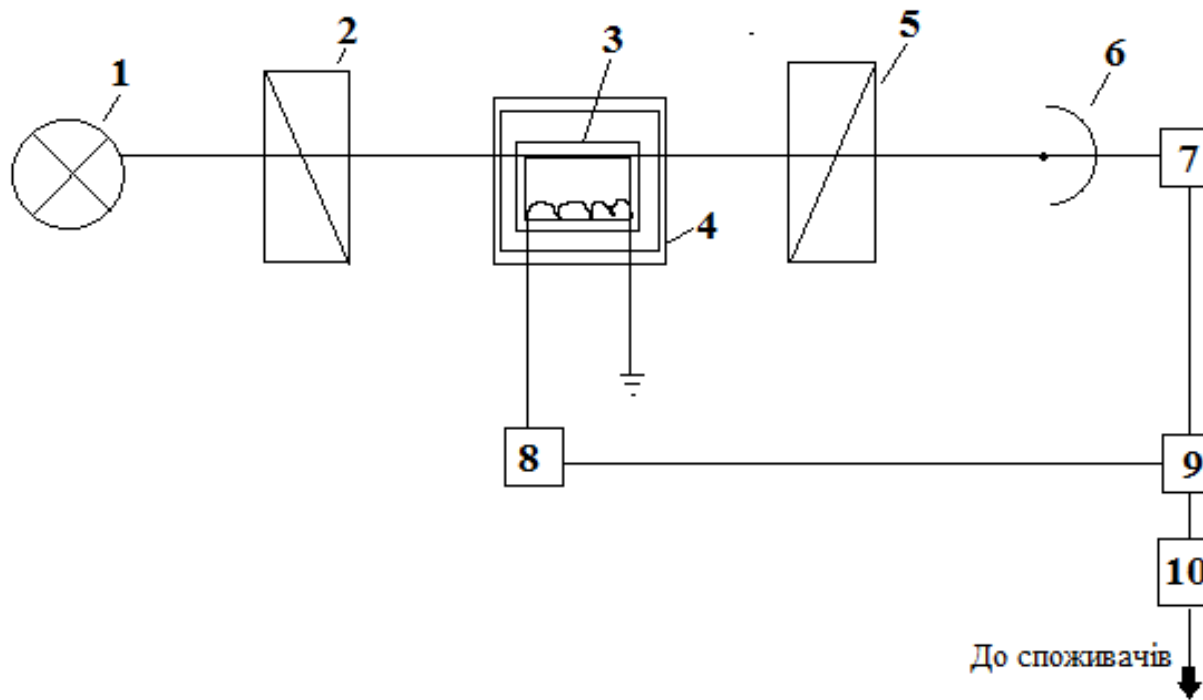


Рис.3.7. Блок-схема каналу для вимірювання магнітного поля

Для фіксації зміни магнітного поля Землі пропонується у якості чутливого елемента використати кристал ітрій ферит-граната, який поміщений в постійне магнітне поле і намагнічений до насичення. Такий тип кристалів широко використовується в радіотехніці як магнітний матеріал.

Відомо, що він також є оптично прозорим в інфрачервоному діапазоні випромінювання. Тому цей кристал застосовують також і в радіо оптиці. Для фіксації зміни магнітного поля використовується залежність повороту площини поляризації світла, що проходить через кристал від магнітного поля, що формується в модуляторі Фарадея. Поворот площини поляризації реєструється за допомогою фотополяриметра. Модулятор Фарадея, що входить до складу фотополяриметра, складається з полікристала 4 і кристала ітрій ферит-граната 3, які поміщені в магнітне поле і утворюють замкнутий магнітопровід. Світловий потік проходить через кристал ітрій ферит-граната, в якому відбувається додаткове розгойдування площини поляризації світла.

Фотополяриметр працює наступним чином: світло від джерела випромінювання 1 послідовно проходить через поляризатор 2, комірку Фарадея 3, аналізатор 5 і потрапляє на фотоприймач 6, де оптичне випромінювання перетворюється в електричний сигнал. Цей сигнал підсилюється вузько смуговим підсилювачем 7, для збільшення чутливості проходить синхронний детектор 9. Генератор електричних сигналів 8 формує керуючі сигнали для фарадеївської комірки.

В процесі експлуатації модулятора під дією зовнішніх факторів на його виході може бути не чіткий «розмитий» сигнал. Для отримання чіткого сигналу на всіх етапах експлуатації застосовують фільтр Калмана.

Попередньо, до початку встановлення фото поляриметричного пристрою на літак, в заводських умовах, система налаштовується до зникнення сигналу на вході при відсутності магнітного поля Землі. Як тільки система потрапляє під дію магнітного поля Землі, що впливає на комірку Фарадея, баланс системи порушується і на виході виникає сигнал відмінний від нуля, що є результатом повороту площини поляризації оптичного випромінювання на певний кут, значення якого пов'язане зі зміною вектора напруженості магнітного поля Землі.

Поведінка самочинної намагніченості феритів-гранатів рідкоземельних елементів істотно відрізняється від нормального вейсовського ходу. Існує не

одна точка, де самочинна намагніченість речовини дорівнює нулю. Таку поведінку намагніченості можна пояснити з позиції розгляду кристалічної комірки цих речовин, що складається з трьох підкомірок. Всередині кожної підкомірки існує негативна обмінна взаємодія. Отже, існування точки компенсації, де результуюча намагніченість дорівнює нулю, можна пояснити рівністю по абсолютній величині результуючої намагніченості під комірок іонів заліза і рідкоземельних елементів.

Для спінового резонансу, коли деяким наближенням можна вважати, що середовище має одну магнітну підкомірку, гіромагнітний ефект Фарадея дорівнює

$$(3.15)$$

де α – кут повороту площини поляризації, n – діелектрична проникливість, H – гіромагнітне відношення, M – намагніченість насичення, C – швидкість світла.

Зміна кута повороту площини поляризації світла, що проходить, визначається за формулою

$$(3.16)$$

де зміна вектора напруженості магнітного поля Землі.

Звідси знайдемо вираз для максимальної чутливості фіксації зміни вектора напруженості магнітного поля Землі:

$$(3.17)$$

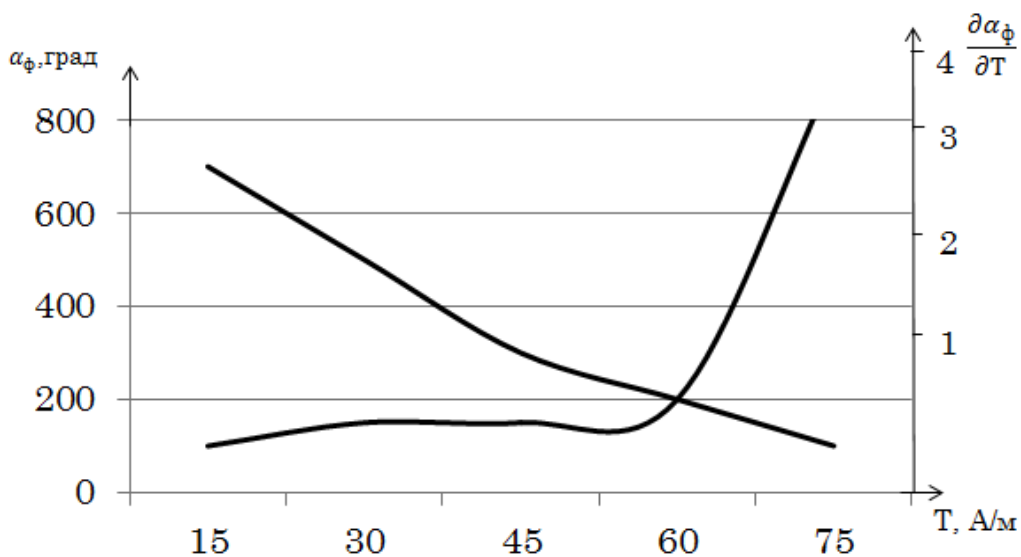


Рис. 3.8. Залежність кута повороту площини поляризації світла і його похідної від магнітного поля

На рис. 3.8 представлені залежності кута повороту площини поляризації світла та його похідної від зміни значення вектора напруженості магнітного поля Землі. На ділянках кривої в діапазоні значень T від 20 – 65 А/м, похідна набуває значень 0,81-0,92 кутов.град. А/м. Максимальна крутизна кривої спостерігається в області значень 70-100 А/м. На цій ділянці значення похідної дорівнюють 1,7 – 4,06 кутов.град. А/м.

Зазначимо, що при роботі з кристалами, в яких крім точки Кюрі існує ще одна точка, де самочинна намагніченість речовини дорівнює нулю можна досягти ще більшої чутливості фіксації магнітного поля в наслідок того, що в точці компенсації відбувається стрибок кривої залежності .

Датчик магнітного поля. Ефект Фарадея.

Сутність цього ефекту полягає в тому, що під впливом магнітного поля, вектор напруженості якого збігається з напрямком світла, спостерігається поворот площини поляризації світла, що проходить через речовину. Кут обертання Фарадея при напруженості магнітного поля H , довжині світлового шляху в речовині L виражається як

$$(3.18)$$

Тут величина V , звана постійною Верде, характеризує активність ефекту Фарадея для даної речовини.

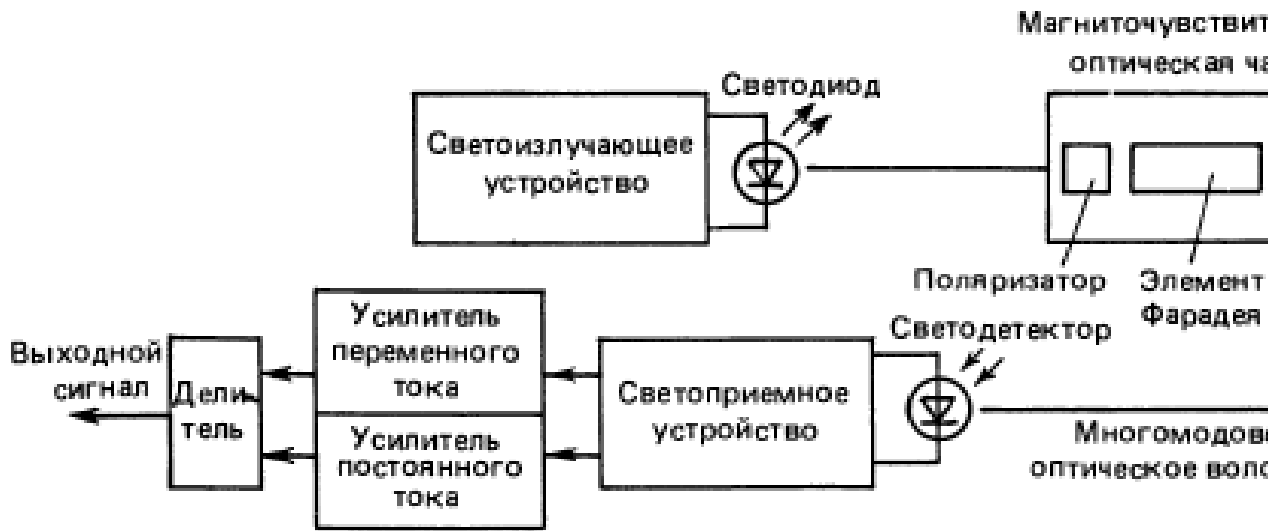


Рис. 3.9. Датчик магнітного поля на основі ефекту Фарадея

На рис. 3.9 приведена структурна схема датчика магнітного поля. Світлові промені передаються від джерела світла (звичайного светодиода) в світлочутливу частину датчика за допомогою багатомодового оптичного волокна. В чутливій частині світлова хвиля з лінійною поляризацією потрапляє через поляризатор в елемент Фарадея, де під впливом магнітного поля відбувається поворот площини поляризації. Значення кута повороту перетворюється аналізатором в яскравість світла, і далі світло передається оптичним волокном в світлоприймальний пристрій. При цьому, якщо встановити кут між поляризатором і аналізатором 45° , то світлова потужність на поверхні детектора (зазвичай рпн-фотодіода)

$$(3.19)$$

де P_0 – потужність світла при відсутності магнітного поля.

Як ми бачимо з формули, магнітне поле можна вимірювати по електричному сигналу детектора. Для компенсації дрейфу вимірюваного сигналу при змінному магнітному полі використовується перетворення «змінний струм - постійний струм», а при постійному полі- метод двох вихідних світлових променів (див. рис. 3.9).

Матеріали для елемента Фарадея. Характеристики матеріалів з ефектом Фарадея наведені в табл 3.1. Серед них на практиці особливо важливі діамагнітні матеріали, такі, як свинцеве скло, (BGO), (BSO) та інші,

що відрізняються слабкою температурною залежністю характеристик, а також феромагнітні: – у вигляді об'ємних монокристалів, – у вигляді тонких епітаксійних плівок та інші, для яких характерна температурна стабільність властивостей.

Подивимось основні моменти, пов'язані з проектуванням датчиків, в яких застосовуються оптично активні і феромагнітні матеріали. В оптично активних речовинах, на зразок діамагнетиків BGO, BSO та інших, поворот площини поляризації відбувається за рахунок не тільки ефекту Фарадея, а й оптичної активності. Тому кут повороту ϕ буде виражатися сумою:

$$(3.20)$$

де - оптична активність.

Таблиця 3.1

Основні характеристики типових матеріалів з ефектом Фарадея

Матеріал	Структура	Постоянная Верде, $\text{мин}/(\text{Э.см})$	Оптическая активность, $\dots^\circ/\text{мм}$	Длина волны, мм	Температурная стабильность постоянной Верде
Ди ама гнет и ки					
Свинцовое стекло	Аморфная	0,04	—	0,85	$\pm 0,5\%$ ($-25 \dots 100^\circ\text{C}$)
As_4S_3 -стекло	»	0,10	—	0,90	$\pm 1\%$ ($-10 \dots 80^\circ\text{C}$)
ZnSe	Кристаллическая (кубическая)	0,21	—	0,82	$\pm 1\%$ ($20 \dots 120^\circ\text{C}$)
$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	То же	0,10	10,5	0,87	$\pm 1\%$ ($-13 \dots 85^\circ\text{C}$)
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	»	0,188	9,6	0,85	$\pm 1,5\%$ ($-25 \dots 85^\circ\text{C}$)
П ара ма гнет и ки					
Стекло FR-5	Аморфная	0,11	—	0,85	$\pm 15\%$ ($-25 \dots 85^\circ\text{C}$)
Ф ер ро ма гнет и ки					
YIG	Кристаллическая (кубическая)	9,0	—	1,30	$\pm 8\%$ ($-25 \dots 85^\circ\text{C}$)
$(\text{Tb}_{0,19}\text{Y}_{0,81})\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	То же	15,6	—	1,15	$\pm 1,5\%$ ($-20 \dots 120^\circ\text{C}$)
$(\text{YSmLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$	»	49	—	0,83	$\pm 0,5\%$ ($-20 \dots 80^\circ\text{C}$)

У феромагнітних матеріалах внаслідок високої намагніченості насичення ефект Фарадея проявляється сильніше. Тоді в залежності від співвідношення між напруженістю зовнішнього магнітного поля і намагніченістю насичення кут повороту визначається наступним чином:

де α - кут повороту при $H = H_0$.

Отже, при проектуванні датчиків магнітного поля на основі вищеописаних матеріалів можна скористатися формулою (3.19), підставивши в неї вираз ϕ за формулою (3.20) або за формулою (3.21).

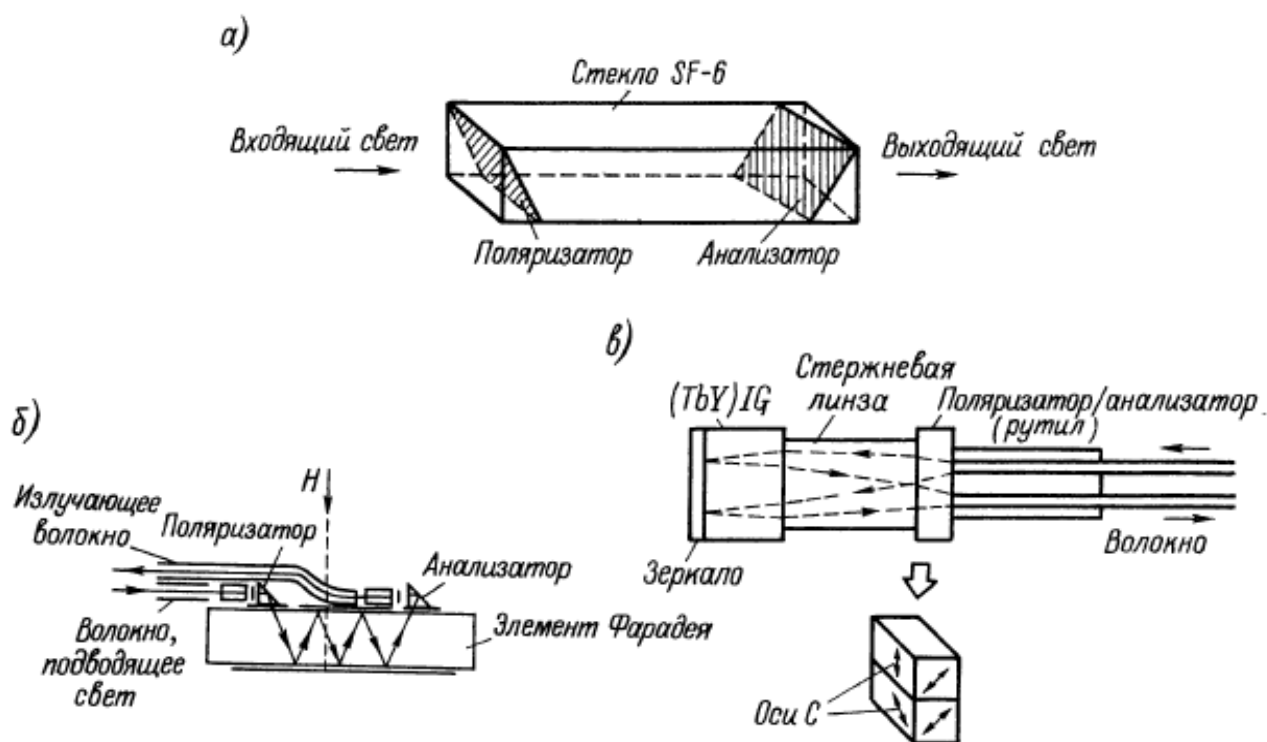


Рис. 3.10. Магніточутлива оптична частина датчика: а – з поєднанням оптичних елементів; б – з багаторазовим відображенням; в - відбивного типу на основі магнітострикції

Перевага датчиків на діамагнітних матеріалах - можливість вимірювання ними напруженості магнітного поля в широкому діапазоні - від десятків до декількох тисяч ампер на метр. Феромагнітні ж матеріали при більш високій напруженості магнітного поля в силу властивості магнітного

насичення мають нелінійні характеристики, але зате датчики на їх основі малогабаритні.

Датчик з об'єднаннями оптичних елементів. На рис. 3.10 (а) представлена чутлива частина датчика магнітного поля, у якого в якості матеріалу для елемента Фарадея використовується свинцеве скло. На склі безпосередньо виготовляється поляризатор і аналізатор багат шарового типу (діелектричні плівки /). Завдяки конструктивному об'єднанню цих елементів підвищується надійність датчика і знижується його собівартість. Як джерело світла використовується світлодіод ($\lambda = 0,85$ мкм), світлового детектора - рпн-фотодіод. Оптичне волокно - багатомодове з кварцового скла з діаметром сердечника 100 мкм. Датчик з довжиною оптичного шляху 20 мм дозволяє вимірювати напруженість магнітного поля 80...4000 А / м (10...500Е) з нелінійністю не гірше $\pm 0,25\%$ і при відношенні сигнал - шум не менше 40 дБ ($B = 1$ кГц). Температурна похибка $\pm 0,5\%$ в діапазоні від -25 до 86°C.

Датчик з багаторазовим відображенням. Цей датчик представлений на рис. 3.10 (б). У ньому обертання Фарадея відбувається поряд з багаторазовим відображенням входить до свинцеве скло світлового променя. При цьому промінь, відбиваючись від верхньої і нижньої поверхні скла, не змінює поляризацію. Для б0лее повного відображення на ці поверхні напилюється багат шарова плівка з властивостями чвертьволнової пластини. Одна з переваг такого датчика - подовження дійсного оптичного шляху, а отже, і збільшення глибини модуляції інтенсивності магнітним полем. При використанні для передачі світла багатомодового оптичного волокна, для прийому - джгута з оптичних волокон, а в якості джерела світла - світлодіода на основі *AlGaAs* мінімальна вимірювана напруженість магнітного поля 400А/м (≈ 5 Е), діапазон вимірювань 0...40000 А/м (0... 500 Е), лінійність $\pm 1\%$. Нерівномірність частотної характеристики ± 3 дБ в смузі від 3 до 750Гц.

Датчик на основі феромагнітного матеріалу. В ході дослідження складу кристалів розроблений термостабільний монокристал залізоіттрієвого

граната , який виявився дуже підходящим для датчика магнітного поля. На рис. 3.8 (в) представлена структура такого датчика з магніточутливою частиною відбивного типу. Як джерело світла використовується світлодіод на основі InGaAsP ($\lambda = 1.3\text{мкм}$), а поляризатора і аналізатора світла - термостабільний, механічно міцний рутил. Чутливість датчика складає 10% зміни інтенсивності світла на кожні 8000 А/м ($\approx 100 \text{ E}$). Коливання амплітуди вихідного сигналу $\pm 1, 5\%$ при температурі від -20 до 120°C.

3.5. Підвищення якісних характеристик вимірювальних комплексів

Найкращі результати підвищення якісних характеристик вимірювальних комплексів досягаються в системах зі структурною надмірністю. У теперішній час широке розповсюдження знайшли такі способи сумісної обробки однорідної інформації, яка надходить від декількох вимірників:

- взаємна компенсація і фільтрація похибок вимірювальних приладів, які вимірюють один і той самий навігаційний параметр;
- оптимальне оцінювання вектора стану з використанням апріорної інформації про контрольований процес та поточні вимірювання, які реалізує алгоритм оптимальної фільтрації Калмана.

Схема компенсації. Схема компенсації отримала найбільш широке розповсюдження при обробці пілотажно-навігаційної інформації у випадках, якщо один і той же навігаційний параметр вимірюється двома або декількома вимірниками, робота яких базується на різних фізичних принципах. У цьому випадку алгоритм компенсації, що дозволяє значно зменшити похибки вимірювання, реалізується за схемою, що наведена на рис. 3.11.

Рис. 3.11. Схема компенсації

Сигнали вимірників B_1 і B_2 , які крім, вимірюваної величини x містять в собі сигнали похибок ξ_1 та ξ_2 , надходять на вхід пристрою віднімання ПВ₁, на виході якого формується сигнал

$$\xi = (x + \xi_1) - (x + \xi_2) = \xi_1 - \xi_2. \quad (3.22)$$

Цей сигнал проходить крізь динамічний фільтр $F(p)$ і на другому пристрої ПВ₂ віднімається з сигналу першої (коректованої) системи.

Рівняння такої системи може бути записано у вигляді

$$, \quad (3.23)$$

де похибка комплексної системи.

Якщо вибрати фільтр $F(p)$ таким, щоб він з мінімальним спотворенням пропускав заваду ξ_1 і заглушував заваду ξ_2 , то похибка комплексної системи буде мінімальною, тобто похибка ξ зменшується залежно від різниці в спектральних характеристиках завад ξ_1 та ξ_2 . При значній різниці в

частотних характеристиках завад на виході фільтра $F(p)$ (див. рис.3.11) повністю буде відтворюватися завада ξ_1 , а на виході другого пристрою віднімання ПВ₂ відтворюється точне значення вимірюваного параметра x , оскільки

$$(3.204)$$

Але реальний фільтр, пропускаючи частку енергії завади ξ_1 , не повністю заглушує заваду ξ_2 , як наслідок цього вихідний сигнал схеми, окрім потрібної величини x буде містити похибку .

Відповідно до зазначених умов $F(p)$ повинен бути фільтром низьких частот, тоді фільтр з характеристикою $[1 - F(p)]$ стає фільтром високих частот. Фільтр низьких частот може бути реалізований в простішому випадку за допомогою реальної аперіодичної ланки з передаточною функцією

$$(3.25)$$

де T – стала часу фільтра.

Передаточна функція фільтра високих частот

$$(3.26)$$

являє собою реальну диференціювальну ланку.

З урахуванням вище викладеного, схему компенсації, що наведена на рис. 3.11, можна подати як еквівалентну схему отримання оцінки (рис. 3.12).

Рис. 3.12. Еквівалентна схема отримання оцінки

Враховуючи передбачуваний характер спектральних характеристик ξ_1 і ξ_2 спектральних щільностей i (рис. 3.13), можна навести графіки спектральних характеристик сигналів похибок i (дисперсій похибок $D (*_1)$ та $D (*_2)$), отриманих в результаті проходження сигналів через відповідні

фільтри з амплітудно-частотними характеристиками (АЧХ) $[1 - F(j)]$ та $F(j)$.

Рис. 3.13. Спектральні щільності

Якщо похибки ξ_1 і ξ_2 є стаціонарні та статично незалежні випадкові функції часу зі спектральними щільностями та , то дисперсії похибок вихідних сигналів визначаються за формулами:

$$(3.27)$$

де , середньоквадратичні похибки вихідних сигналів.

Дисперсія похибки системи при реалізації способу компенсації має вигляд:

$$(3.28)$$

На основі рис. 3.13 можна зробити висновок, що дисперсія похибки системи тим менша, чим більше відрізняються за частотою спектральні щільності похибок вхідних сигналів. Таким чином, задача комплексування двох вимірників полягає у виборі такої частотної характеристики фільтра $F(j\omega)$, щоб після підсумовування сигналів (див. рис. 3.12) параметр на виході схеми був близький до вимірюваного параметра $x(t)$.

Схему компенсації можна реалізувати, використовуючи схему зі зворотним зв'язком (рис. 3.14). Рівняння похибок у цьому випадку еквівалентні отриманим раніше для схеми компенсації без зворотного зв'язку (див. рис. 3.11).

Рис.3.14. Схема зі зворотним зв'язком

Для схеми компенсації, зображеної на рис. 3.14, можна записати:

$$(3.29)$$

звідки маємо

$$(3.30)$$

де .

При $F(p) = Tr$ рівняння похибок повністю співпадають.

Схема фільтрації. Схема фільтрації у випадку, коли один і той самий параметр вимірюється двома вимірниками, має вигляд, наведений на рис. 3.15.

Рис. 3.15. Схема фільтрації

Сигнал на виході такої системи описується рівнянням

(3.31)

або

(3.32)

Для того, щоб система не вносила динамічних похибок, необхідно виконати умову

$$\Phi_1(p) + \Phi_2(p) = 1. \quad (3.33)$$

У цьому випадку вихідний сигнал буде мати вигляд

(3.35)

де

Так, при $\Phi_2(p) = F(p)$ вираз (3.30) перетворюється на вираз (3.23), що свідчить про еквівалентність схем компенсації і фільтрації.

Взаємна компенсація та фільтрація можуть бути успішно застосовані в роздільній та слабко зв'язаних схемах. Алгоритми схеми компенсації добре відпрацьовані на практиці й прості за своєю апаратною реалізацією, до того ж у порівнянні з оптимальною калманівською фільтрацією вони більш швидкодійні.

Якщо використовувати ці алгоритми сумісно зі схемами позиційної та швидкісної корекції можна також визначити безпосередньо в польоті похибки датчиків первинної інформації (здійснити польотне калібрування датчиків), що дозволить підвищити точність автономної роботи систем.

Методи оптимальної обробки інформації. Методи оптимальної обробки інформації в навігаційних комплексах використовуються з метою отримання оцінок вектора стану ПС (або деякої частини цього вектора) в умовах впливу випадкових збурень і завад на процес вимірювання. При цьому оцінюються не самі параметри польоту, а їхні похибки.

Нехай вектор стану динамічної системи описується векторно-матричним рівнянням

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{V}(t), \quad (3.36)$$

де n -мірний вектор стану системи; $\mathbf{A}(t)$ квадратна матриця розмірності $n \times n$, яка являє собою матрицю коефіцієнтів системи; k -мірний вектор збурень, які діють на вході динамічної системи; $\mathbf{B}(t)$ матриця збурень, розмірності $n \times k$.

Вважаємо, що компоненти вектора лінійно зв'язані з випадковими функціями типу білого шуму, мають нульові математичні сподівання $M[\mathbf{V}_x(t)] = 0$ і характеризуються кореляційною матрицею $\mathbf{R}_x(t) = M[\mathbf{V}_x(t)\mathbf{V}_x^T(t)]$.

Отже,

$$\begin{aligned} M[\mathbf{V}_x(t)] &= 0; \\ M[\mathbf{V}_x(t)\mathbf{V}_x^T(t)] &= \mathbf{R}_x(t)\delta(t-t'), \end{aligned} \quad (3.37)$$

де M – символ математичного сподівання; $\delta(t-t')$ дельта-функція.

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{W}(t) \quad (3.38)$$

зв'язаний вектор спостережень $\mathbf{Y}(t)$ розмірності m .

У рівнянні (3.33) $\mathbf{H}(t)$ – матриця зв'язку (матриця спостереження). Необхідною умовою оптимального оцінювання є повна спостережливість вектора стану $\mathbf{X}(t)$ за вектором спостереження $\mathbf{Y}(t)$.

Вважається, що процес $\mathbf{X}(t)$ цілком спостережний на інтервалі $t \in [t_1, t_2]$, якщо за значенням вектора $\mathbf{Y}(t)$ при $t \in [t_1, t_2]$ можна вичислити значення вектора $\mathbf{X}(t)$ при $t \in [t_1, t_2]$. Умови повної спостережливості виконуються при $m = n$. Оскільки компоненти вектора $\mathbf{Y}(t)$ вимірюються з похибками, то як наслідок вимірювання отримують новий вектор, так званий вектор вимірювання

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{Y}(t) + \mathbf{V}_z(t), \quad (3.39)$$

де $\mathbf{V}_z(t)$ вектор похибок вимірювання (припускається, що компоненти вектора $\mathbf{V}_z(t)$ можна подати у вигляді білого шуму з нульовим математичним сподіванням). Вектор $\mathbf{V}_z(t)$, аналогічно вектору $\mathbf{V}_x(t)$, характеризується кореляційною матрицею $\mathbf{R}_z(t)$ розмірності $m \times n$, тобто

$$M[\mathbf{V}_z(t)] = \mathbf{0};$$

$$M[(\mathbf{V}_z(t), \mathbf{V}_z(t))] = \mathbf{R}_z(t)(t). \quad (3.40)$$

Допускаємо, що компоненти векторів $\mathbf{V}_x(t)$ і $\mathbf{V}_z(t)$ некорельовані, на підставі викладеного математичну модель динамічної системи та рівняння спостереження можна записати у вигляді

$$(3.41)$$

При оптимальній обробці інформації в навігаційних комплексах (НК) найбільш важливим процесом є процес отримання оптимальних оцінок. В основу алгоритмів отримання оптимальних оцінок можуть бути покладені такі методи обробки інформації:

- метод найменших квадратів (МНК);
- метод максимуму правдоподібності;
- рекурентний метод (оптимальний фільтр Калмана).

Алгоритм неперервного оптимального фільтра Калмана. Алгоритм неперервного оптимального фільтра Калмана (ОФК) об'єднує розв'язання двох задач: спостереження та фільтрації. Принцип побудови ОФК розглянемо для випадку лінійної системи, описаної системою рівнянь (3.41). Ставиться задача знайти такі оцінки, щоб похибки оцінювання

$$(3.42)$$

були мінімальними. Іншими словами, необхідно забезпечити мінімум суми діагональних елементів матриці

$$(3.43)$$

У коваріаційній матриці $\mathbf{P}(t)$ члени характеризують дисперсії похибок оцінювання співпадаючих координат x_i , а члени їхню взаємну кореляцію.

Ми знаємо, що для динамічної системи (3.15) оптимальним фільтром, що забезпечує мінімум сліду матриці \mathbf{P} , стає алгоритм, який складається з трьох блоків:

1) основного блоку

$$(3.44)$$

2) блоку обчислення коефіцієнтів корекції

$$(3.45)$$

3) блоку розв'язання рівняння коваріацій

$$(3.46)$$

Цей алгоритм забезпечує оцінювання всіх координат вектора \mathbf{X} при виконанні умов спостережливості динамічної системи. Його особливість полягає у виборі коефіцієнтів матриці \mathbf{K}_f . Вихідні значення оцінок визначаються за попередньою інформацією про координати вектора \mathbf{X} . Коваріаційну матрицю поточних похибок оцінювання $\mathbf{P}(t)$ необхідно обчислювати безперервно в процесі оцінювання або попередньо, якщо це можливо.

Зміст рівняння коваріацій, за яким розраховується матриця $\mathbf{P}(t)$, пояснюється так: якщо модель динамічної системи ідеально точна, то реальні похибки оцінювання для фільтра, побудованого за вказаним рівнянням, будуть співпадати з коваріаціями $\mathbf{P}(t)$ і при цьому вони будуть мінімальні. Отже, оптимальність фільтра буде досягнута тільки у випадку точного опису структури моделі системи та правильних обраних параметрів: \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_z .

Ось чому при синтезі систем оцінювання особливу увагу приділяють процесу складання математичних моделей вимірників та досліджуваної системи.

Пояснимо фізичний зміст деяких елементів ОФК.

У рівнянні коваріацій (3.46) член $\mathbf{A}(t)\mathbf{P}(t)+\mathbf{P}(t)\mathbf{A}^T(t)$ характеризує зміну похибок в результаті власного руху системи. Для стійкої системи елементи матриці $\mathbf{A}(t)$ ($a_{ij} < 0$), що визначає зменшення швидкості зміни дисперсій похибок оцінювання співпадаючих координат (i) і призводить до зменшення похибок, оскільки в стійкій системі i (початкова невизначеність із часом зменшується).

Множник $\mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}_z^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t)$ характеризує ефект корекції оцінок від вимірників i завжди визначає i , тобто вказує на зменшення похибок оцінювання.

Множник $\mathbf{B}(t)\mathbf{R}_x(t)\mathbf{B}^T(t)$, що характеризує величину невизначеності контрольованого процесу, завжди визначає i , а значить похибки оцінювання не можуть, бути зведені до нуля.

Зауважимо що, оскільки рівняння коваріацій (3.46) автономне і не зв'язане з реальними вимірюваннями $\mathbf{Z}(t)$, то його розв'язання може бути виконано окремо від основного алгоритму фільтра й навіть заздалегідь. Перед розв'язанням рівняння коваріацій необхідно оцінити та задати початкові значення $\mathbf{P}(0)$ на основі аналізу точності інформації про координати вектора $\mathbf{X}(t)$ і початкові значення i , яка існує до вмикання фільтра. На практиці, зазвичай, обмежуються завданням головної діагоналі $p_{ii} < 0$, тобто вихідних дисперсій похибок оцінювання, вважаючи, що

З часом процес розв'язання рівняння коваріацій (рис.3.16) приходиться до усталеного значення $\mathbf{P}_{уст}$, при якому виконується рівність

$$(3.47)$$

Рис. 3.16. Рівняння коваріацій

Задача оцінки параметрів полягає в знаходженні компромісу при фільтрації завади, спектр якої визначений \mathbf{R}_Z і корисного сигналу, спектр якого визначений як \mathbf{R}_X , з урахуванням динамічних характеристик процесу, тобто матриці коефіцієнтів системи \mathbf{A} .

Зауважимо, що для стійкої та детермінованої системи, тобто при відсутності випадкових збурень ($\mathbf{R}_X = 0$), завжди та .

Таким чином, із часом похибка оцінювання наближається до нуля. При цьому шуми вимірників не впливатимуть на похибку оцінювання, оскільки самі вимірники відключаються від схеми фільтра при $\mathbf{P} = 0$ і, як наслідок, відповідно до рівняння коефіцієнтів корекції $\mathbf{K}_\Phi = 0$. При синтезі фільтрів цей ефект необхідно враховувати і до збурень \mathbf{V}_X відносити не тільки реальні фізичні збурення, наприклад, вітрові збурення, що діють на ЛА, але й можливі неточності завдання моделей процесу і вимірювання керувань.

У рівнянні коефіцієнтів корекції матриця \mathbf{K}_Φ має вигляд:

$$(3.48)$$

Елементи цієї матриці характеризують зв'язок сигналу вимірника z_j з оцінкою координати . Матриця спостережень \mathbf{H}^T у рівнянні коефіцієнтів корекції визначає такий факт: якщо координата x_i не бере участь у формуванні сигналу z_j , то коефіцієнт = 0. Між коефіцієнтами і p_{ij} відповідно до рівняння корекції існує пряма залежність, що свідчить про те, що підсилення корекції оцінок відбувається сильніше в тих координатах, у яких більші передбачувані похибки оцінювання, а обернена залежність коефіцієнтів і $R_{z_{ij}}$ (у рівнянні корекції) визначає більш значні сигнали корекції від більш точних вимірників.

Як висновок, зобразимо структурну схему алгоритму ОФК, що відповідає наведеним вище рівнянням (рис. 3.17).

Рис.3.17. Структурна схема алгоритму ОФК

Зауважимо, що оскільки при обчисленні \mathbf{K}_Φ необхідно обчислювати обернену матрицю, то ні для одного з вимірників не можна задати $R_{z,ij}=0$, а якщо такий вимірник існує, то необхідно штучно задати малий розмір $R_{z,ij}$.

Висновок.

В даному розділі ми дослідили матеріали, які виконують функції магнетиків, класифікацію датчиків на основі поляризованого світла та принцип їх роботи, зроблено розрахунок параметрів поляриметра та проведено підвищення якісних характеристик вимірювальних комплексів.

ВИСНОВКИ

В роботі представлено розробку пристрою для вимірювання магнітного курсу літака. Принцип його дії ґрунтується на поляриметричному методі вимірювання. Чутливим елементом цього пристрою є комірка Фарадея, яка реагує на магнітне поле Землі, змінюючи при цьому пропорційно кут повороту площини поляризації світлового променя поляриметра. Пристрій для вимірювання магнітного курсу є безплатформеним і здійснює вимірювання компонентів магнітного поля відносно трьох осей, які прив'язані до системи координат літака. Такий тип конструкції та застосування поляриметричного методу вимірювання дає можливість зменшити габарити до розміру мініатюрних та масу пристрою, що розроблявся. Також така конструкція дозволяє значно підвищити точнісні характеристики вимірювача магнітного курсу.

Матеріал дипломної роботи рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців з льотної та технічної експлуатації повітряних суден.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боднер В.А., Фридендер Г.О., Чистяков Н.И. Авиационное приборы. М.: Оборонгиз, 1960. — 513 с.
2. Барвинский А.П., Козлова Ф.Г. Электрооборудование самолётов: Учебное пособие. – М.: Транспорт, 1981. – 288 с.
3. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Перевод с японского. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
4. Воробьев В.Г, Глухов В.В., Кадышев И.К. Авиационные приборы, информационно измерительные системы и комплексы. Учебник для ВУЗов. — М.: Транспорт, 1992. — 399 с.
5. Скрипещь А.В., Тронько В.Д., Асанов М.М. Спосіб реєстрації кута обертання площини поляризації світлового променя з використанням оптично прозорих феримагнітних кристалів. – Укр. фіз. журн. №9,2003 р.
6. Протоєрейський О.С., Запорожець О.І. Охорона праці в галузі: Навчальний посібник. – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 268 с.
7. Ісаєнко В.М., Криворотько В.М., Франчук Г.М. Екологія та охорона навколишнього середовища. Дипломне проектування: Навчальний посібник. – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 192 с.
8. Техническое описание поляриметра ПКС-125.
9. Бондар П.М. Вимірювальні перетворювачі, прилади та системи (конспект лекцій).

