

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО  
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 629.05

**ГІРОКОМПАС З НЕПРЯМИМ КЕРУВАННЯМ  
ДЛЯ НАЗЕМНИХ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ***Заморський О. В.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [zax2020@ukr.net](mailto:zax2020@ukr.net)*

*Стаття має дві частини. Перша частина є історичним оглядом створення двох поколінь морських і наземних гірокомпасів, з прямим і непрямим керуванням. При огляді гірокомпасів з прямим керуванням (маятникових гірокомпасів), з використанням періоджерел і авторитетних другорядних джерел, виділено основні практичні й аналітичні розробки, які призвели до створення першого промислово застосованого морського гірокомпаса. Огляд гірокомпасів з непрямим керуванням (коректованих гірокомпасів) значною мірою є оригінальним дослідженням витоків їх створення, проведеним через аналіз доступних патентів, враховуючи відсутність інших доступних ранніх джерел. Виділяються розробки по патенту Н. Аха (1906, Німеччина), в якому, ймовірно, вперше з'явилася схема гірокомпаса з непрямим керуванням, по патенту П. Бассета (1923, США), в якому, ймовірно, вперше з'явилася схема належного налаштування гірокомпаса з непрямим керуванням, інші розробки. Розглядаються також розробки гірокомпаса з електромагнітною корекцією П. Коптяєва (1932, 1951-1954, СРСР) і основні промислові розробки коректованих гірокомпасів на теренах колишнього СРСР. В огляді також коротко вказані основні експлуатаційні властивості морських і наземних гірокомпасів, в тому числі гірокомпасів нового покоління на основі волоконно-оптичних і напівсферичних резонаторних гіроскопів, інерціальних систем орієнтації і вказування курсу. З першої частини мотивовано впливає друга частина даної роботи, в якій досліджується гірокомпас з непрямим керуванням для наземних рухомих об'єктів на основі динамічно налаштованого гіроскопа на стабілізованій в площині горизонту платформі. Визначається загальна модель похибок такого гірокомпаса при приведенні головної осі гіроскопа в площину істинного (географічного) меридіану в напрямку на Північ і в напрямку на Південь. Надається схема апаратної компенсації систематичних похибок гірокомпаса. Вирішується, через непрямі вимірювання, проблема визначення і компенсації власного дрейфу гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу. Проводиться оцінка параметрів гірокомпаса з непрямим керуванням на основі динамічно налаштованого гіроскопа, як приладу навігаційного класу точності.*

**Ключові слова:** *гірокомпас; непряме керування; динамічно налаштований гіроскоп; похибки.*

**Вступ**

Гіроскопічні компаси (ГК), як автономні засоби визначення курсу об'єкта або істинного (географічного) азимуту заданого напрямку, є базовими приладами систем орієнтації, навігації та керування рухом мобільних об'єктів різного призначення. При поступовому історичному розвитку морських і підводних, повітряних і космічних, наземних рухомих об'єктів, виникають ті чи інші технічні вимоги, які спонукають до вдосконалення засобів визначення курсу об'єкта або до їх розробки на нових фізичних принципах. ГК є порівняно складними та наукоємними приладами. Тому будь-які наукові та практичні дослідження ГК для визначення їх властивостей і параметрів, методик і принципів налаштування з метою покращення технічних і експлуатаційних характеристик ГК, є та будуть в оглядовому майбутньому достатньо актуальними.

Ця робота має дві частини. Перша частина є історичним оглядом створення двох поколінь ГК. При огляді маятникових ГК, з використанням періоджерел і авторитетних другорядних джерел, переслідуються мета систематизувати основні етапи взаємодії практичних і аналітичних напрацювань, які привели до створення першого практично застосованого ГК. Огляд коректованих ГК значною мірою є оригінальним дослідженням витоків їх створення, проведеним через аналіз патентів, враховуючи відсутність інших доступних ранніх джерел. В огляді також коротко вказані основні експлуатаційні властивості ГК, в тому числі нового покоління ГК, інерціальних систем орієнтації та вказування курсу. З першої частини мотивовано впливає друга частина даної роботи, в якій досліджується ГК з непрямим керуванням для наземних рухомих об'єктів на основі динамічно налаштованого гіроскопа на стабілізованій в

площині горизонту платформи. Визначається загальна модель похибок такого ГК, і вирішується, через непрямі вимірювання, проблема визначення та компенсації власного дрейфу гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу.

#### Гіроскопічні компаси. Загальна класифікація

ГК за методом визначення істинного азимуту заданого напрямку розділяються на фізичні та аналітичні. Фізичні ГК володіють вибірковістю головної осі гіроскопа в азимутальному напрямку відносно площини істинного меридіану, а аналітичні ГК визначають заданий азимутальний напрямок відносно площини істинного меридіану через розрахунки на основі даних гіроскопічних датчиків кутової швидкості. За способом надання вибірковості відрізняють фізичні ГК з прямим (маятникові ГК) і непрямим керуванням (коректовані ГК). За способом визначення азимутального напрямку відрізняють статичні та динамічні аналітичні ГК. Залежно від зовнішніх збурень і умов експлуатації вирізняють морські, наземні, авіаційні, орбітальні (вказують напрямок вектора орбітальної кутової швидкості штучного супутника Землі) ГК, які відрізняються між собою особливостями схемних рішень.

#### Гіроскопічні компаси з прямим керуванням – маятникові гірокомпаси. Історична довідка

Історія прикладної теорії гіроскопів, теорії гіроскопічних приладів і систем, почалась з історії практичного створення морського ГК. Всі необхідні умови для цього сформувались в першій половині XIX ст. В цей час загальна теорія, започаткована роботою Л. Ейлера про дослідження прецесії рівнодення і нутації земної осі (публічна доповідь 5 березня 1750 р. в Берлінській академії наук, опублікована в 1751 р. [1]), завдяки працям багатьох вчених, в першу чергу самого Л. Ейлера (1707-1783) і Ж. Л. Лагранжа (1736-1813), розвивалась в рамках теорії руху твердого тіла навколо нерухомої точки. З появою і розвитком у середині XIX ст. кораблів з металевим корпусом і паровими двигунами, сталеві конструкції яких негативно впливали на роботу магнітного компаса, виникла гостра потреба мати інший, немагнітний, автономний засіб визначення напрямку на Північ. Припущення та впевненість, що створення такого засобу можливе, з'явилися завдяки поширеним у першій половині XIX ст. демонстраційним пристроям швидкообертового ротора, який вільно обертається в кільцевому кардановому підвісі з вертикальною зовнішньою віссю, – від першої відомої моделі Г.Й. фон Боненбергера (1817, Німеччина) [2] до знакової моделі політропа Ж. Е. Сіра (1859, Франція) [3]. Моделі В. Р. Джонсона (1831, США) [4] і Л. Фуко (1852, Франція) [5] виділяються як такі, що отримали від авторів власні назви, *ротаскоп* (*rotascope*) [6] і *гіроскоп* (*gyroscope*) відповідно. Перша назва лише з довгим плином часу стала

архаїчною [7], ще для зразків маятникових ГК фірми «Сіменс» (1888) [8] і в відомих теоретичних трактатах О. Мартінсена (1906) [9] зустрічається назва *ротаційний компас* (*rotations compasses*). Друга назва з плином часу стала загальною. Перше припущення, що за допомогою таких пристроїв можна визначити обертання Землі, приписується Ф. Сангу (1836, Британія) [10]. Л. Фуко в публічній доповіді 22 вересня 1852 року в Паризькій академії наук [11] повною мірою, без математичних викладів, описав властивості такого пристрою: напрям осі обертання ротора не змінюється в інерціальному просторі, якщо ротор має три ступені вільності, що дає можливість спостерігати обертання Землі; вісь ротора прагне розміститись в площині меридіану, якщо закріпити внутрішнє кільце підвісу, що дає можливість визначити напрямок на Північ; вісь ротора прагне розміститись паралельно земній осі, якщо закріпити зовнішнє кільце підвісу. Прилад, в основі якого закладена друга властивість, згодом був названий гіроскопом Фуко I роду, або двоступеневим ГК, математична модель якого повною мірою описана, зокрема в [12]. Двоступеневий ГК практично не застосовується, але знання його властивостей важливе для розуміння властивостей інших типів ГК, які практично застосовуються.

Недосконалі моделі гіроскопів (ротоскопів) не могли наглядно продемонструвати властивості ГК до появи в 1859 році відомого лабораторного демонстраційного інструменту, *політропа Сіра*, в якому ротор у кардановому підвісі встановлюється на обертовій моделі Землі – на проградуйованому вертикальному сталевому кільці, що представляє площину меридіану, з латунним стержнем, що представляє земну вісь (рис. 1). При обертанні ручним приводом моделі Землі вісь швидкообертового ротора, при обмеженні його свободи відносно осі внутрішнього кільця карданового підвісу, встановлювалась в площині сталевого кільця, тобто, в площині меридіану. Так наглядно і методично просто демонструвалась робота ГК. У 2007 р. політроп Сіра визнано культурним надбанням Франції [3].

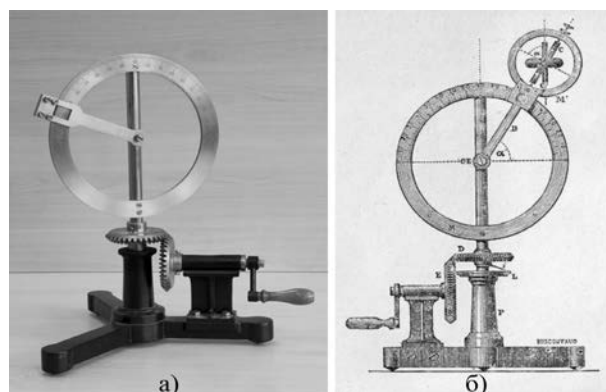


Рис. 1. Політроп Сіра (1859, Франція) [4], де: а) сучасне фото (гіроскоп не зберігся); б) креслення обертової моделі Землі та гіроскопа

Друга половина XIX ст. відзначена спробами промислово розвинутих країн реалізувати працездатний морський ГК, проте, невдало. Але, з'являлись технічні рішення та експериментальні прилади, прототипи майбутніх діючих зразків морського маятникового ГК: прилад Ж. Труве (1865, Франція) [13] з ротором у двохвісному кардановому підвісі з маятником, який згодом отримав власну назву *гіроскоп Труве*; прилад М. Гопкінса (1878, США) [13] з електричним приводом ротора, по схемі гіроскопа Труве; прилад (опис гіростата) В. Томсона (1884, Британія) [14] зі схемою поплавкового підвісу ротора; прилад Е. Дюбуа (1880, Франція) [15] по схемі гіроскопа Труве, проходив корабельні ходові випробування; ротаційний компас В. фон Сіменса фірми «Сіменс» (1888, Німеччина) по патенту М.Г. Ван ден Боса (1886, Голландія) [8] з оригінальною схемою поплавкового підвісу. Відомо, що прилад Н. Аха фірми «Хартман і Браун» (1890-ті, Німеччина) [8] по схемі гіроскопа напрямку, прототип майбутніх ГК з непрямым керуванням (див. наступний підрозділ), проходив корабельні ходові випробування.

Причини невдач реалізації ГК в XIX ст. пов'язані не тільки з рівнем технічного забезпечення, наприклад, з відсутністю ротора з належним кінетичним моментом, лише на початку XX ст. в експериментальних зразках ГК почали використовуватись двигуни змінного струму. Реалізація ГК на той час була приречена на невдачу через відсутність належного аналітичного та методичного забезпечення, розуміння динамічних властивостей ГК і того, яким має бути налаштування ГК для рухомих об'єктів. Прикладна теорія гіроскопів лише зароджувалась.

Закладення спрощеної (прецесійної) теорії гіроскопічних систем приписується роботі В. Томсона і П. Тета (1879, Британія) [16], в якій для пояснення руху системи використано припущення, що кінетичний момент системи практично зумовлений власним кінетичним моментом ротора гіроскопа [13]. У роботі А. Фоппля (1904, Німеччина) [17] вперше аналітично визначено напрямний момент, яким володіє маятниковий ГК при проведенні головної осі в площину меридіану. Маятникові ГК по схемі гіроскопа Труве, ротаційний компас Сіменса налаштовувались так, щоб період їх власних коливань був якомога меншим. Вважалося, по аналогії з магнітною стрілкою, що з кількох ГК з однаковими моментами інерції вищу точність буде мати ГК з меншим періодом власних коливань [8]. Хибність такого налаштування було показано в теоретичному трактаті О. Мартінсена (1906, Німеччина) [9], з аналітичних викладів якого випливала необхідність налаштування маятникових ГК на значний період власних коливань, як оптимальне, рекомендувалось значення періоду, що дорівнює 70 хв. Вказаний трактат з'явився за результатами розробки техніко-економічного

обґрунтування ротаційних ГК по замовленню фірми «Сіменс» і відіграв драматичну роль в конкурентному, але плідному протистоянні вже відомих фірм «Сіменс», «Хартман і Браун» і новоствореної «Аншютц-Кемпфе» (1904, Мюнхен, з 1905 – Кіль, Німеччина). За підтримки О. Мартінсена в фірмі «Сіменс» вважали, що ротаційний ГК за умови бездоганної роботи на нерухомій основі є непридатним для рухомих об'єктів [18].

У фірмі «Хартман і Браун» також висловлювались сумніви щодо належності розробки маятникових ГК (див. наступний підрозділ). Але Г. Аншютц-Кемпфе, спираючись на напрацювання О. Мартінсена та власний практичний досвід розробки ГК, намагався на експериментальному рівні спростувати такі твердження, і його наполегливість досягла успіху.

Маятниковий ГК фірми «Аншютц-Кемпфе» з довгим періодом власних коливань пройшов корабельні ходові випробування (1908, березень-квітень) при безперервній роботі протягом чотирьох тижнів поспіль, що є додатковим вражаючим аспектом надійності ГК, враховуючи суперечливий рівень електротехніки на той час [18]. Створенню першого працездатного ГК було присвячено публічну доповідь Г. Аншютц-Кемпфе (1908, листопад) [19], математичне забезпечення для якої підготував М. Шулер [20], котрий згодом (1910) визначив умову незбурюваності маятникового ГК, так звану *умову Шулера*, вказавши аналітичний вираз періоду власних коливань ГК і його обчислене значення, яке дорівнює приблизно 84,4 хв.

Майже одночасно з фірмою «Аншютц-Кемпфе» свій перший діючий зразок морського маятникового ГК виготовила фірма «Сперрі» (1909, Нью-Йорк, США) [21].

Морські маятникові ГК вирізняються різноманітними схемними рішеннями – з ексцентричним підвісом, з рідинним заспокоювачем коливань, з одним, двома, а то і з трьома гіроскопами, які реалізовані промислово і достатньо повно розроблені теоретично, результати наведені у досить значному переліку літератури, в тому числі академічної, зокрема, відомі якісні напрацювання в [22]. Морським маятниковим ГК притаманне порівняно складне налаштування. Через значний період власних коливань час приводу головної осі гіроскопа в площину меридіану, після включення ГК, може бути досить значним – до кількох годин (при швидкісному приведенні – до години). Морські маятникові ГК накладають деякі обмеження на швидкість руху об'єкта певним курсом, особливо в високих широтах, а також мають значні габарити і вагу.

За точністю морські маятникові ГК відносяться до приладів навігаційного класу (середнього класу точності), у яких похибки визначення курсу рухомого об'єкта складають кілька часток градуса.

### Гіроскопічні компаси з непрямым керуванням – коректовані гірокомпаси. Історична довідка

Маятникові ГК домінували на морських рухомих об'єктах більше півстоліття. З появою та розвитком у середині ХХ ст. швидкісних і маневрених кораблів, інших малогабаритних і мобільних морських транспортних засобів, виникла потреба мати ГК з меншим часом визначення курсу після включення, без обмежень по швидкості та курсу, часто з меншими габаритами та вагою. Технічні напрацювання та прикладна теорія гіроскопів, які завжди взаємно доповнювались і збагачувались, таку потребу задовольнили, з'явилося нове покоління морських ГК – коректовані ГК.

ГК, чутливий елемент якого встановлений на стабілізованій в горизонті платформі і приводиться в меридіан за допомогою прикладених обертових моментів, можна назвати *коректованим* ГК. Вперше таке визначення зустрічається в роботі [23] (1966, СРСР) з посиланням на роботу [24] (1961, США). Коректовані ГК можуть працювати в режимі гіроскопа напрямку (ГН). Тому поширені назви ГК з *непрямым керуванням* або ГН з *непрямою корекцією*,

як синонім, є коректними і сприймаються в вузькому сенсі, як визначення приладів з двовісним кардановим підвісом, для яких стабілізована в горизонті платформа забезпечується іншими, не пов'язаними з елементами ГН і ГК, засобами. Тоді як назва *коректовані* ГК сприймається в широкому сенсі, як визначення завершених приладів, підвіс яких може бути не лише двовісним, а трьохвісним і більше, для забезпечення стабілізації горизонтальної платформи власними засобами. Менш поширені інші назви ГК з *електромагнітною корекцією* [25], ГК з *електромагнітним керуванням* [26], [27], *двохрежимний* ГК [25], [28], ГК з *непрямою корекцією* [29], інші [30] не стали загальними.

ГН мають просту схему на основі астатичного гіроскопа з системою горизонтальної корекції (рис. 2, а). ГН практично і теоретично розроблені, теорія та розрахунок ГН достатньо повно представлені, зокрема, в [31] і [32]. ГК з непрямым керуванням також мають просту схему (рис. 2, б). Відомі схеми для заспокоювання власних коливань ГК з непрямым керуванням, поширеною є схема ГН з непрямою корекцією та ослабленою горизонтальною корекцією (рис. 2, в).

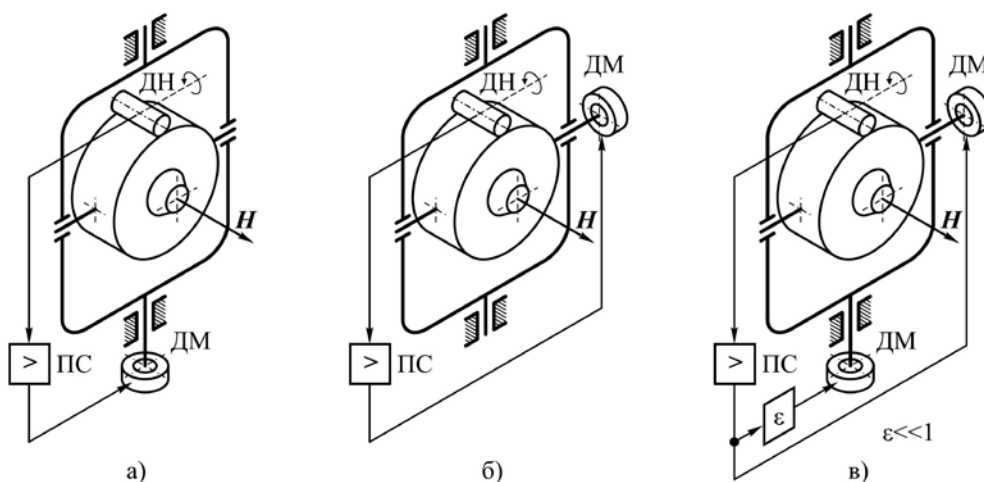


Рис. 2. Схеми ГН і ГК з непрямым керуванням, де: а) ГН; б) ГК з непрямым керуванням; в) ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань; ДН – датчик нахилу, ДМ – датчики моменту, ПС – підсилювачі

Як вказувалось вище, перший ГН, виготовлений фірмою «Хартман і Браун», проходив наприкінці ХІХ ст. корабельні ходові випробування, але як курсовий прилад не викликав на той час особливої зацікавленості через незмогу самостійно виставити головну вісь у необхідному напрямку та через значні похибки утримування заданого курсового напрямку. Єдиний зразок ГН «Хартман і Браун», що зберігся, знаходився (1998) в музеї Мюнхена [33]. Автором цього першого ГН визнається Нарцисс Ах (1871-1946). Відомо, що в дискусії по доповіді Г. Аншютц-Кемпфе (1908, див. попередній підрозділ) Н. Ах, як представник фірми «Хартман і Браун», висловив сумнів, що розробки

маятникових ГК є належними, зауваживши, що демпфуючий механізм маятникового типу, який застосовує фірма «Аншютц-Кемпфе», привносить певний дефект ГК. Далі Н. Ах стверджував, що з фірмою «Хартман і Браун» має розробки ГК, які вигідно вирізняються тим, що повністю уникають демпфування, про що може доповісти на наступному засіданні. Але невідоме жодне джерело про те, що розробка такого ГК згодом була представлена. Незабаром Н. Ах звільнився з фірми «Хартман і Браун» (1911) [33]. Невідомо, розробку якого ГК мав на увазі Н. Ах під час згаданої дискусії, але напевно, за аналогією з гіроскопом Фуко, політропом Сіра, гіроскопом Труве, в якому

вперше створено маятниковий підвіс гіроскопа, гіроскоп по патенту № 875036 (1906, США) (рис. 3) [34] за правом можна назвати *гіроскопом Аха*, в якому вперше з'явилася схема непрямої корекції ГН – схема ГК з непрямим керуванням.

В описі гіроскопа Н. Ах зазначив, що елементи його винаходу не призначені для обов'язкового використання загалом, кожне вдосконалення (всього в патенті 28 позицій вдосконалень) може використовуватись окремо, або в будь-якій сукупності за певним призначенням.

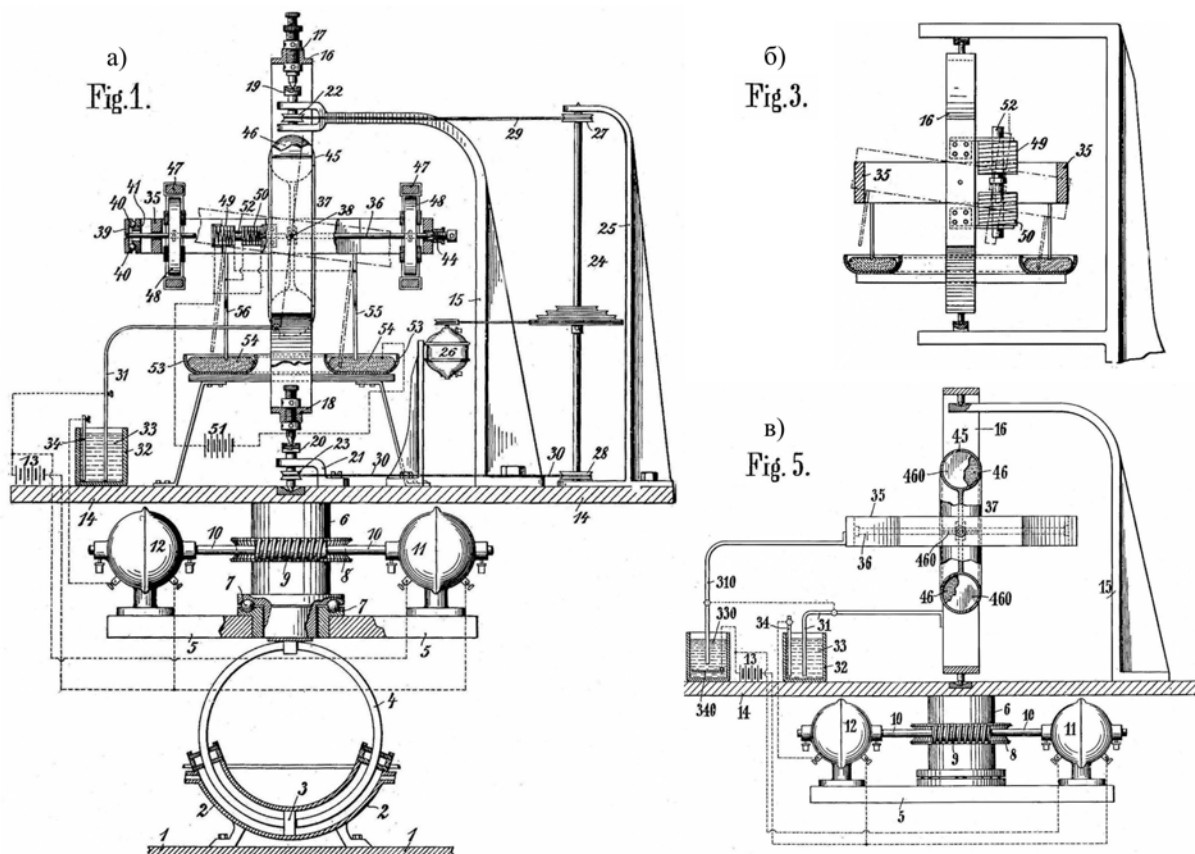


Рис. 3. Гіроскоп Аха (1906, Німеччина), патент US № 875036 (1907, США) [34], де: а) Fig. 1. – вертикальний розріз; б) Fig. 3. – варіант системи непрямої корекції; в) Fig. 5. – варіант системи горизонтальної корекції

Гіроскоп Аха (рис. 3) є триступеневим астатичним гіроскопом із збалансованим важким обертовим тілом (*spinning body*) 37 (ротором гіроскопа) з горизонтальною віссю обертання 36, внутрішньою рамою 35 карданового підвісу з горизонтальною віссю обертання 38, зовнішньою рамою 16 карданового підвісу з вертикальною віссю обертання в підшипниках 19 і 20. Вертикаль зовнішньої осі підвісу забезпечується горизонтальною платформою 14 і відповідними кронштейнами 15, 21 для підшипників підвісу. Стабілізація горизонтальної платформи не є предметом гіроскопа Аха, в описі вказаний лише варіант одновісної стабілізації, виконавчим пристроєм якої є встановлений на корпусі рухомого об'єкта насос подвійної дії (*double-acting pump*) 2 з поршнем 3 на кільцеподібному стрижні 4, жорстко зв'язаним з плитою 5, на якій у підшипниках 7 монтується стійка 6 з стабілізованою платформою 14. Ротор гіроскопа приводиться в рух двома двигунами змінного струму, статори 47 яких закріплені на внутрішній рамі підвісу, а ротори 48 на

осі обертання ротора гіроскопа. Для зменшення впливу тертя по вертикальній осі підвісу, що надзвичайно важливо для ГК з непрямим керуванням, підшипники забезпечені відповідними шківками 22 і 23, які обертаються в різні боки приводом, що складається з двигуна 26, який приводить в рух змонтовану в кронштейні вісь 24 з відповідними шківками 27, 28 і приводними шнурами 29, 30. Подібна схема, зменшення впливу тертя в осях підвісу на основі крокових реверсивних двигунів з вмонтованими в них підшипниками, досі використовується в курсових системах. У гіроскопі Аха, для збереження властивостей астатичного гіроскопа, передбачене динамічне балансування обертової системи (у цій роботі далі не розглядається).

У гіроскопі Аха представлено дві схеми *непрямої корекції*, тобто, можна визначити дві модифікації ГК з *непрямим керуванням*, які мають однакову елементну базу. Електрична схема (рис. 3, а), Fig.1) містить джерело живлення 51, датчик нахилу і датчик моменту. Горизонт визначається поверхневим рівнем

ртуті 54, що наповнює кільцеподібну посудину 53, яка встановлена на стабілізованій платформі. Датчик нахилу утворюється горизонтальною поверхнею ртуті 54 і електропровідними стрижнями 55 і 56, які жорстко пов'язані з внутрішньою рамою підвісу і можуть занурюватись в ртуть при нахилі осі обертання ротора гіроскопа. Датчик моменту утворюється електромагнітними котушками 49 і 50 з осердям 52. При знаходженні осі обертання ротора гіроскопа в нейтральному стані, в площині горизонту, обидва стрижні занурені в ртуть, електричний опір в ланцюгах стрижнів однаковий, електромагнітні котушки не живляться, осердя електромагнітів знаходяться в нейтральному стані, обертова система зрівноважена – момент відносно осі внутрішньої рами підвісу відсутній. При нахилі осі обертання ротора гіроскопа відносно площини горизонту в той чи інший бік, той чи інший стрижень перестає бути зануреним в ртуть, електричний опір в ланцюгах обох стрижнів відрізняється, відповідно та чи інша електромагнітна котушка підключається до джерела живлення, осердя з нейтрального стану переміщується відповідно в той чи інший бік – виникає відповідний момент відносно осі внутрішньої рами підвісу. У модифікації (рис. 3, а), Fig.1) електромагнітні котушки та їх осердя закріплюються на внутрішній рамі підвісу, в модифікації (рис. 3, б), Fig.3) котушки закріплюються на зовнішній рамі підвісу, а осердя – на внутрішній рамі підвісу. Друга модифікація відповідає сучасним схемам, коли статор датчика моменту закріплюється на зовнішній рамі підвісу, а ротор – на внутрішній рамі підвісу.

У гіроскопі Аха також представлено дві схеми горизонтальної корекції. Можна виділити схему

(рис. 3, в), Fig.5), в якій поєднані елементи поширених схем горизонтальної корекції – маятникової (посудини з рідиною (ртуть), що встановлені на стабілізованій горизонтальній платформі, разом з зануреними в рідину контактами, можна визнати за прототипи сучасних маятникових рідинних датчиків) і міжрамочної (один полюс рідинного датчика нахилу жорстко закріплений на зовнішній рамі підвісу, а інший полюс – на внутрішній рамі підвісу). Виконавчими елементами горизонтальної корекції є двигуни 11 і 12, які обертаються в різні боки, на вертикальну вісь підвісу гіроскопа момент передається черв'ячною передачею 9.

Вірогідно, першим налаштованим ГК з непрямою корекцією є ГК Престона Бассетта (1923, фірма «Сперрі», США) [35], видатного інженера, відомого, між іншим, тим, що разом з Елмером Сперрі і Джиммі Дулітллом створив авіаційні інструменти – гірогоризонт і гірополукомпас фірми «Сперрі», за допомогою яких була забезпечена перша сліпа посадка літака, тепер її називають інструментальною посадкою, яка була здійснена Дулітллом (1929).

ГК Бассетта (рис. 4) призначений для морських об'єктів, що одразу зрозуміло по його елементах, кільцю нактоуза і картушці. Проте, протягом довгого часу передбачалося і стверджувалося, що саме ГК з непрямою корекцією може замінити авіаційний гірополукомпас, наприклад, в розробці ГК з непрямою корекцією Р. Хаскінса (1943, фірма «Сперрі», США) [36] проголошується мета створення ГК для авіації, в розробці розглядаються схеми переключення режиму ГК на режим ГН і навпаки, залежно від маневру об'єкта.

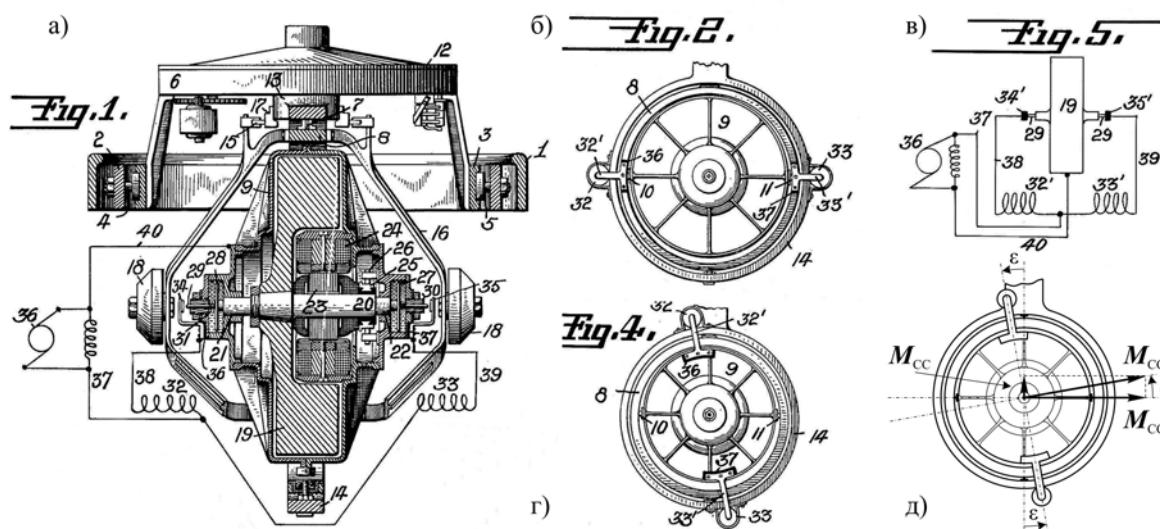


Рис. 4. Гірокомпас Бассетта (1923, «Сперрі», США), патент US № 1749059 (1930, США) [35], де: а) Fig. 1 – вертикальний розріз; б) Fig. 2 – налаштування ГН, в) Fig. 5 – схема системи спостереження; г) Fig. 4 – налаштування ГК з непрямою корекцією з заспокоюванням власних коливань; д) окремий додаток, до аналізу параметрів налаштування ГК Бассетта

Бассетт називає свій ГК врівноваженим (*normally balanced*) або не маятниковим (*or non-pendulous*) ГК. ГК (рис. 4, а), Fig.1) складається з кільцевого двовісного карданового підвісу горизонтальної стабілізації і карданового підвісу триступеневого гіроскопа, на якому змонтовано вертикальний кільцевий псевдо підвіс (*phantom ring*) слідкуючої системи. Підвіс для горизонтальної стабілізації складається з зовнішнього 2 і внутрішнього 3 кілець з взаємно перпендикулярними осями підвісу, вісь підвісу внутрішнього кільця утворена опорами 4 і 5 (вісь підвісу зовнішнього кільця в нактоузі 1 на кресленку не показана). Внутрішнє кільце на кронштейнах підтримує стабілізоване в площині горизонту кільце 6 (процес забезпечення стабілізації в описі не розглядається), в якому монтується зовнішня вертикальна вісь підвісу 7 гіроскопа (зв'язок на кресленку не показаний) з вертикальним кільцем 8. Триступеневий гіроскоп 9 має ще дві горизонтальні вісі підвісу – вісь власного обертання 20 і вісь підвісу кожуха гіроскопа в вертикальному кільці 8, яку утворюють підшипникові опори 10 і 11 (рис. 4, б), Fig.2, г), Fig.4).

Для забезпечення роботи ГК Бассетт використовує оригінальну загальну комбіновану систему корекції, яку називає системою спостереження за чутливим елементом (*sensitive element follow-up system*). Для цього слугує псевдо підвіс, що складається з рами 16, яка пов'язана з кільцем 14 жорстко, а з вертикальною віссю 7 підвісу через втулку 13 з підводами струму 15. На рамі 14 розміщуються електромагніти 32, 33, а на кільці 8 (рис. 4, б), Fig.2) або на кожусі гіроскопа 9 (рис. 4, г), Fig.4) їх осердя 32', 33'. Електромагніти з осердями є загальними виконавчими елементами системи стеження, які одночасно забезпечують *непряму* і *горизонтальну* корекцію гіроскопа, або, залежно від налаштування, одну із названих корекцій. У першому випадку отримується ГК з заспокоєнням власних коливань (рис. 2, в), в іншому – отримується ГК без заспокоювання власних коливань (рис. 2, б) або ГН (рис. 2, а).

Схема системи спостереження (схема систем корекцій) показана на кресленку (рис. 4, в), Fig.5), де 36 – джерело живлення системи. Датчик нахилу осі 20 власного обертання гіроскопа утворюють штоки 29, 30 (рис. 4, а), Fig.1), які замикають відповідні контакти 34, 35 в разі нахилу гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу в той чи інший бік, тиск штоків на контакти залежить від кута нахилу осі гіроскопа. Замість контактів 34, 35 пропонуються вуглецеві блоки (*carbon blocks*) 34', 35', опір яких змінюється залежно від тиску на них. При знаходженні осі обертання гіроскопа в нейтральному стані, в площині горизонту, електричний опір вуглецевих блоків однаковий, електромагніти 32, 33 збуджені однаково, їх осердя знаходяться в нейтральному стані, обертова система зрівноважена – момент відносно осі внутрішньої рами підвісу

відсутній. При нахилі осі обертання ротора гіроскопа відносно площини горизонту в той чи інший бік, тиск штоків на один вуглецевий блок збільшується, на інший – зменшується, електричний опір в ланцюгах і збудження електромагнітів змінюється відповідно, що викликає відповідну зміну сил, які діють на осердя електромагнітів так, що виникає пара сил і відповідний момент відносно осі, перпендикулярної осі кріплення осердя і електромагнітів.

Аналіз можливого налаштування ГК Бассетта показує, що коли вісь 32-33 кріплення електромагнітів горизонтальна, як показано на кресленні (рис. 4, б), Fig. 2), загальний момент  $M_{CC}$  системи спостереження припадає на вертикальну вісь підвісу – ГК Бассетта перетворюється в аналог ГН з системою горизонтальної корекції (рис. 2, а), момент корекції  $M_{ГК}$  якої є загальним моментом  $M_{CC}$  системи спостереження:  $M_{ГК}=M_{CC}$ . Коли вісь кріплення електромагнітів вертикальна, загальний момент  $M_{CC}$  системи спостереження припадає на горизонтальну вісь підвісу – ГК Бассетта перетворюється в аналог ГК з непрямым керуванням (рис. 2, б), момент  $M_{НП}$  непрямої корекції якого є загальним моментом  $M_{CC}$  системи спостереження:  $M_{НП}=M_{CC}$ . Коли електромагніти розмістити на псевдо підвісі так, що вісь їх кріплення знаходиться під малим кутом  $\varepsilon$  до вертикальної осі підвісу, як показано на кресленні (рис. 4, д), г), Fig.4), загальний момент  $M_{CC}$  системи спостереження розподіляється між горизонтальною і вертикальною осями підвісу. При використанні перших членів розкладу в ряди Маклорена тригонометричних функцій проєкцій  $M_{ГК}$  і  $M_{НП}$ , кут  $\varepsilon$  визначається як:

$$\varepsilon = \frac{M_{ГК}}{M_{НП}}$$

Отже, ГК Бассетта з системою спостереження за чутливим елементом, в якому загальний момент керування прикладається в площині, що утримує осі підвісів чутливого елемента (гіроскопа), під кутом  $\varepsilon$  до горизонтальної осі підвісу, є аналогом ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань з коефіцієнтом  $\varepsilon$  ослаблення горизонтальної корекції (рис. 2, в) та електромеханічним аналогом маятникового ГК з ексцентричним підвісом з ексцентриситетом  $\varepsilon$ .

Як і в історії з маятниковими ГК, в історії коректованих ГК від перших зразків до їх широкого застосування пройшло немало часу. Необхідно було вирішити низку технічних проблем, які були пов'язані, у першу чергу, з інструментальними похибками і з розвитком елементної бази. Розвиток методичного забезпечення і методичні похибки вже не були такими критичними, як у випадку розробки маятникових ГК. Відомо, що для створення точного ГК необхідна не менш точна вертикаль, необхідно було відповідно вирішити проблему горизонтальної стабілізації. Відомо, що для ГН критичними є шкідливі моменти відносно горизонтальної осі підвісу, а для ГК відносно вертикальної осі підвісу,

необхідно було належно вирішити проблему зменшення тертя в осях підвісу. Значна частина проблем вирішилась з промисловою реалізацією нових чутливих елементів, гіроскопів з внутрішнім кардановим підвісом – динамічно налаштованих гіроскопів, але це станеться в другій половині ХХ ст.

Наприкінці першої половини – на початку другої половини ХХ ст. з'явилися розробки коректованих ГК, схеми яких наближені до сучасних. Серед них виділяються розробки корпорації «Бош Арма» (Нью-Йорк, США), коректований ГК Дж. Агінса (1947) [37] і коректований ГК колективу авторів (1959) (рис. 5) [38], серед яких Чарльз Давенпорт, автор вищезгаданого нарису [24] про коректовані ГК. Саме в корпорації «Бош Арма», спираючись на напрацювання Рональда Арнольда і Леонарда Мандера (1940-ві, університет Единбурга, Шотландія) і розробки корпорації «Керфотт» (початок 1960-х, Нью-Джерсі, США) [39] Едвін Хоу розробив перший динамічно налаштований гіроскоп (ДНГ – *Dynamically Tuned Gyro – DTG*) (1963) [40].

В цей час (початок 1960-х) з'являються перші публікації в СРСР: про дворежимний ГК з електромагнітною корекцією (електромагнітним керуванням) в доповідях П. П. Коптяєва (1960) [25] і В. М. Мітника (1960) [26]; про гіроазимут, працюючий в режимі ГК, в виданні М. М. Богдановича і П. А. Ільїна (1961) [30]; колективне авторське свідоцтво винаходу дворежимного ГК (1961) [28], в елементах якого, як

прототипи, вгадуються елементи ГК Коптяєва (розробки 1940-1956 рр.) [25]; про коректовані ГК і коректовані гірогоризонткомпаси в згаданому вище виданні Я.Н. Ройтенберга (1966) [23]; інші.

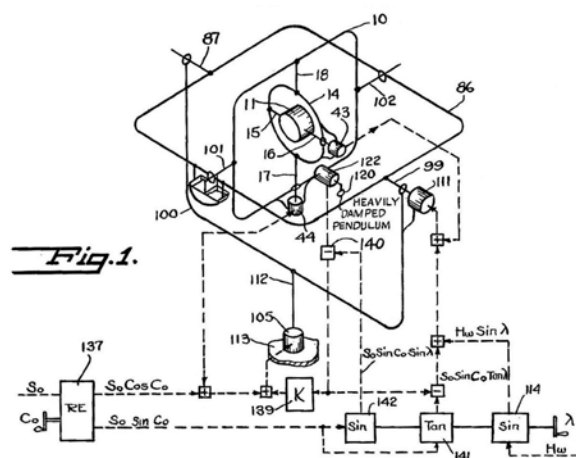


Рис. 5. Коректований ГК корпорації «Бош Арма» (1959, США) [38]

Пропозиція першого в СРСР комбінованого приладу, який працює в двох режимах, ГН і ГК, приписується П.П. Коптяєву (1934) [30, с. 159]. У згаданій вище роботі [25] автор подає схему свого першого комбінованого приладу (1934), реконструкція якої представлена на кресленнику (рис. 6).

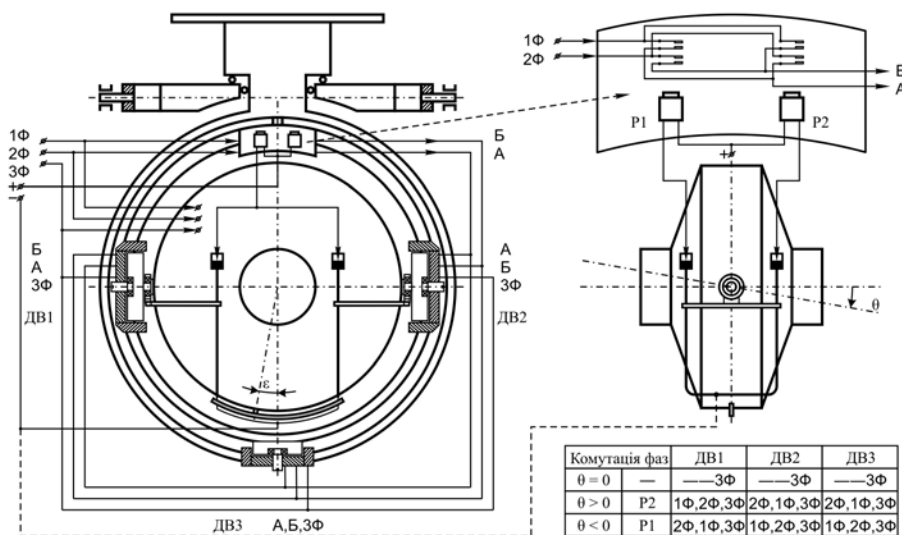


Рис. 6. Дворежимний ГК з електромагнітною корекцією П. П. Коптяєва (1934, СРСР) [25], де: реконструкція схеми з аналізом комутації фаз виконавчих двигунів ДВ1, ДВ2, ДВ3 (P1, P2 – виконавчі реле)

За конструкцією підвісу ГК П. П. Коптяєва нагадує морський маятниковий ГК і складається з зовнішнього підвісу горизонтальної стабілізації та карданового підвісу триступеневого гіроскопа. Датчик нахилу працює на тих же принципах, що у гіроскопа Аха, але ще більш наближений, як аналог, до компактних сучасних рідинних датчиків, і

складається з двох легких струмопровідних капілярів наповнених рідиною (ртуттю). Капіляр монтується на кожусі гіроскопа так, як його аналог, рідинний заспокоювач власних коливань маятникового ГК. На кресленнику ГК присутня ще одна ознака маятникового ГК, ексцентричний маятниковий підвіс з ексцентриситетом  $\epsilon$ . В якості



датчиків моменту використовуються трьохфазні асинхронні двигуни або електромагніти, два по внутрішній горизонтальній осі підвісу гіроскопа, які накладають моменти в різні боки при синфазному живленні, один по зовнішній вертикальній осі підвісу. При нахилі осі гіроскопа відносно горизонту в той чи інший бік на кут  $\theta$ , через відповідний ланцюг одного з капілярів відповідне виконавче реле замикає контакти комутації фаз двигунів так, що обидва двигуни по горизонтальній осі підвісу створюють відповідний обертовий момент в одному напрямку. Для переходу з режиму ГН в режим ГК, або навпаки, вмикаються або вимикаються статорні обмотки двигунів на горизонтальній осі підвісу. Отже, ГК П. П. Коптяєва зразка 1934 р. є гібридним ГК з незначним маятниковим ефектом і електромагнітним керуванням. А вже вдосконалений експериментальний ГК П. П. Коптяєва зразка 1951-1954 рр. з астатичним гіроскопом, зовнішнім двоступеневим маятниковим підвісом для стабілізації вертикалі, ручною і автоматичною комутацією режимів роботи, проміжним вертикальним слідкуючим кільцем з безперервними незгасаючими коливаннями для зменшення впливу тертя по вертикальній осі підвісу гіроскопа тощо, є ГК з непрямым керуванням. Зразок пройшов лабораторні та натурні випробування в умовах штилю.

В СРСР розробка перших промислово реалізованих коректованих ГК серії «ГКУ» [41] з сферичним чутливим елементом (з одним гіроскопом) в рідинно-торсіонному підвісі, які призначались для малих швидкісних кораблів військово-морського флоту, належить НДІ «Дельфін» (1968, Москва, Росія) [42]. Інші розробки НДІ «Дельфін»: коректований ГК «Вега» (1970) класу «ГКУ» для цивільного флоту; малогабаритний коректований ГК «Яхта» (1980-1990-ті) на основі

нових чутливих елементів, динамічно налаштованого гіроскопа (ДНГ) і кварцового акселерометра компенсаційного типу, як індикатора горизонту. Інші розробки коректованих ГК на основі ДНГ на теренах колишнього СРСР: ГК «Круїз» НВО «Київський завод автоматики» (1993, Київ, Україна) [43], [44] і ГК «Гюйс» ОАО «ПНППК» (1999, Перм, Росія).

Як і морські маятникові ГК, коректовані ГК відносяться до приладів навігаційного класу (середнього класу точності), у яких похибки визначення курсу руху об'єкта, залежно від широти  $\phi$  його місцезнаходження, складають частки градуса, від 0,1-сек  $\phi$  до 0,3-сек  $\phi$  (статичні похибки), від 0,4-сек  $\phi$  до 0,7-сек  $\phi$  (динамічні похибки).

На сучасному ринку морських ГК коректовані ГК практично витіснили маятникові, але швидкими темпами розвивається ринок нового покоління компактних ГК (рис. 7), аналітичних, інерціальних систем на основі волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ – Fibre-Optic Gyroscope – FOG) і твердотільних вібраційних гіроскопів (ТВГ – напівсферичних резонаторних гіроскопів – hemispherical resonator gyro – HRG), які для морських об'єктів отримали назву системи орієнтації і вказування курсу (attitude heading reference system – AHRS) або гірогоризонткомпаси. Наприклад: системи орієнтації і вказування курсу на основі ВОГ «Navigat 4000» компанії «Sperry Marine» корпорації «Northrop Grumman» (США) [45] і «Octans» компанії «iXblue» (Франція) [46]; гірогоризонткомпас на базі ВОГ «PGM-V-024» компанії «ПНППК» (Росія) [47]; системи орієнтації і вказування курсу на основі ТВГ «BlueNaute» корпорації «Safran Electronics & Defense» (Франція) [48] і «Standard 30 MF» компанії «Raytheon Anschütz» (Німеччина) [49].

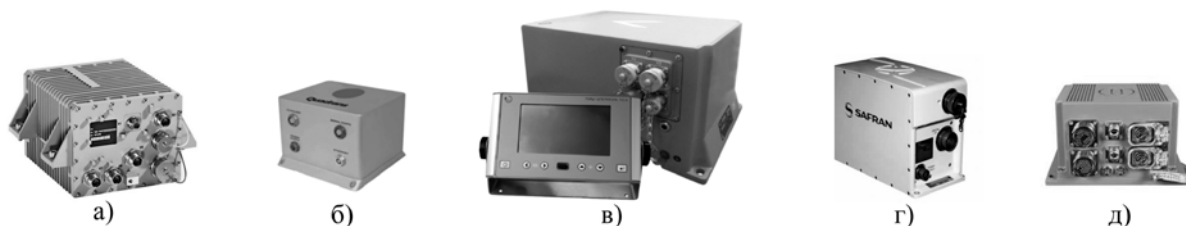


Рис. 7. Нове покоління морських ГК. Головні модулі систем орієнтації і вказування курсу (attitude heading reference systems – AHRS), де: а) «Navigat 4000» на основі ВОГ (147×220×240 мм, 6,0 кг) компанії «Sperry Marine», США; б) «Octans» на основі ВОГ (160×160×113 мм; 2,8 кг) компанії «iXblue» (Франція); в) «PGM-V-024» на основі ВОГ (325×230×174 мм; 12,5 кг) компанії «ПНППК» (Росія); г) «BlueNaute» на основі ТВГ (208×275×136 мм; 4,7 кг) корпорації «Safran» (Франція); д) «Standard 30 MF» на основі ТВГ (143×145×240 мм; 3,3 кг) компанії «Raytheon Anschütz» (Німеччина).

На теперішній час вказані аналітичні морські ГК дещо поступаються за досягнутою точністю фізичним морським ГК. Крім того, вказані аналітичні ГК забезпечують свої характеристики в тісній

інтеграції з супутниковими навігаційними системами (СНС – Global Position Systems – GPS), чим поступаються фізичним ГК в автономності роботи.

### Наземні гіроскопічні компаси. Історична довідка

Наземні ГК для *топографічних* робіт з'явилися як подальший розвиток маятникових ГК. Функціонування наземних ГК, порівняно з морськими, вирізняється відсутністю механічних зовнішніх збурень, незгасаючими або слабо згасаючими коливаннями головної вісі гіроскопа відносно площини істинного меридіану з періодом менше періоду Шулера, завдяки чому мають спрощені схему та налаштування. Наземні маятникові ГК будуються зазвичай не за схемою трьохвісного гіроскопа, як морські ГК, а за схемою двовісного гіроскопа з торсійним або електромагнітним підвісом, напрямком осі якого співпадає з напрямком вертикалі місця. При роботі такого ГК на наземному рухомому об'єкті необхідна його розв'язка від корпусу об'єкта при стоянці (зупинці) об'єкта. Наземні ГК обладнані оптичним приладом, теодолітом, для прив'язки азимутального напрямку, вимірюваного ГК, до орієнтира або об'єкта.

Перший експериментальний зразок наземного маятникового ГК з'явився майже відразу після успішної реалізації морських ГК (1912-1915 рр. – розробка М. Шулера, 1919-1921 рр. – практична реалізація фірми «Аншютц»). У лабораторних умовах ГК показав високі результати по точності, похибка визначення напрямку на Північ становила 20" [8], вага вказаного зразка ГК Шулера складала 350 кг, а час одиничного визначення азимутального напрямку біля 6 год. Спроби реалізувати, через деякий час, *маркшейдерський* ГК (1934-1937 рр. – науково-дослідне маркшейдерське бюро, СРСР) і *артилерійський* ГК (1937 р. – фірма «Аншютц», 1942-1944 рр. – фірма «Крайзельгерете», Німеччина), не були успішними. Після другої світової війни активні розробки наземних ГК відновились і майже одночасно, в першій половині 1950-х рр., зразки ГК для *маркшейдерських* робіт, розроблені в СРСР (ГК серії «М», Всесоюзний науково-дослідний маркшейдерський інститут – ВНДМІ, науковий керівник П.А. Ільїн) і в Німеччині (ГК серії «MW», Клаустальська гірнична академія, науковий керівник О. Релленсман), успішно пройшли випробування в промислових гірничих умовах. В Німеччині такий ГК отримав назву *вказівник меридіану (Meridian Wiser)*. Прототипами вказаних ГК були навігаційні корабельні ГК «Курс» і «Аншютц». Перша модель серії «MW» з торсійним підвісом розроблена в 1958 р. – ГК «MW4», в СРСР перший ГК з торсійним підвісом створений в 1963 р. – ГК «МТ1» [50], [51]. Відомі розробки наземних маятникових ГК з торсійним підвісом корпорації «Лір Зіглер» (1958-1977 рр., США) [52], які отримали назву *шукачі Півночі (North-Seeking Gyroscope)* або *шукачі меридіану (Meridian-Seeking Instrument)*. Наземні маятникові ГК розроблялись і виготовлялись також в Угорщині, Канаді,

Великобританії, Швейцарії, Японії. Традиційним розробником і виробником наземних ГК є казенне підприємство «Арсенал» (Київ, Україна), високоточні автономні автоматичні маятникові ГК якого з торсійними і електромагнітними підвісами [53] призначені для визначення астрономічних азимутів напрямків на місцевості, на стаціонарних об'єктах, мобільних об'єктах на стоянці [54].

Наземні маятникові ГК відносяться до прецизійних приладів (високого класу точності), у яких похибки визначення істинного азимуту заданого напрямку складають кілька кутових секунд.

Наземним маятниковим ГК притаманні значні час підготовки до вимірювання і час самого вимірювання істинного азимуту заданого напрямку, а також значні габарити і вага. Необхідність розв'язки корпусу ГК від корпусу рухомого об'єкта при його стоянці (зупинці) для проведення виміру азимутального напрямку, значно ускладнює експлуатацію таких ГК на рухомих об'єктах. Тому потреба в іншому, не маятниковому, автономному засобі визначення напрямку на Північ для наземних рухомих об'єктів є актуальною. Відома пропозиція застосування на наземних рухомих об'єктах ГК з непрямим керуванням (1946) [55] (рис. 8). Такі ГК були розроблені та промислово освоєні. Але історія їх створення потребує окремого дослідження.

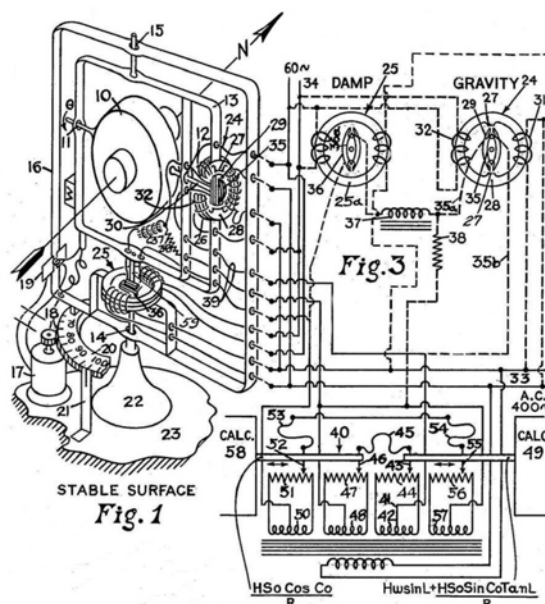


Рис. 8. ГК з непрямим керуванням для наземних рухомих об'єктів (Дж. Агінс, 1946, «Bosh Arma», США) [55]

Якщо академічна література по теорії та розрахунку морських маятникових ГК значна і майже повна, то теорія та розрахунок наземних маятникових ГК [53], коректованих морських ГК [44] і ГК з непрямим керуванням, зокрема, якому присвячені наступні підрозділи, ще висвітлюється.

### Гіроскопічний компас з непрямым керуванням

Кінематична схема приладу на основі триступеневого астатичного гіроскопа з вертикальною зовнішньою віссю підвісу, яка встановлюється по вертикалі місця стабілізованою в площині горизонту платформою (далі стабілізація платформи не розглядається), представлена на кресленні (рис. 9).

Прилад може працювати в режимі ГН або в режимі ГК з непрямым керуванням. Вибір режиму ГН або режиму ГК здійснюється перемикачем режимів (ПР): при положенні 2 перемикача прилад працює за схемою ГН з горизонтальною корекцією; при положенні 1 – за схемою ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань послабленою, порівняно з режимом ГН, горизонтальною корекцією.

Диференціальні рівняння руху ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань [30]:

$$\begin{cases} \ddot{\beta} + \nu \varepsilon \dot{\beta} + U_3 \cos \varphi (\nu + U_3 \cos \varphi) \beta = U_3^2 \sin \varphi \cos \varphi; \\ \ddot{\alpha} + \nu \varepsilon \dot{\alpha} + U_3 \cos \varphi (\nu + U_3 \cos \varphi) \alpha = -\nu \varepsilon U_3 \sin \varphi. \end{cases}$$

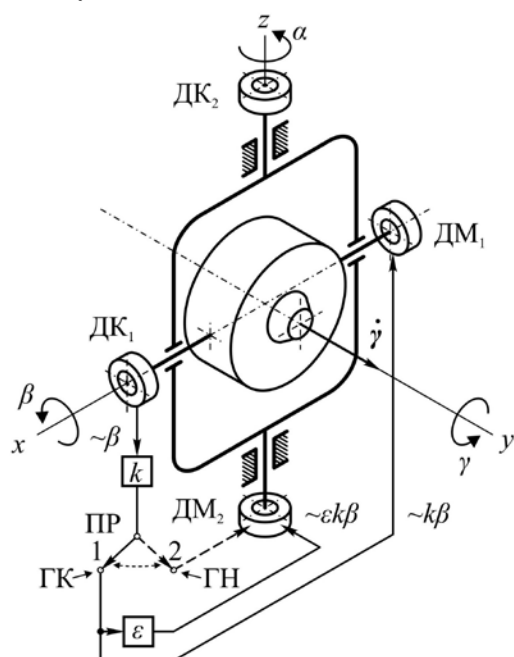


Рис. 9. ГК з непрямым керуванням на стабілізованій платформі

Інші визначення диференціальних рівнянь руху ГК:

$$\begin{cases} \ddot{\beta} + 2h\dot{\beta} + \omega_0^2 \beta = U_3^2 \sin \varphi \cos \varphi; \\ \ddot{\alpha} + 2h\dot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = -\nu \varepsilon U_3 \sin \varphi; \\ \tau^2 \ddot{\beta} + 2\zeta \tau \dot{\beta} + \beta = \frac{U_3 \sin \varphi}{\nu + U_3 \cos \varphi}; \\ \tau^2 \ddot{\alpha} + 2\zeta \tau \dot{\alpha} + \alpha = -\frac{\nu \varepsilon \operatorname{tg} \varphi}{\nu + U_3 \cos \varphi}; \end{cases}$$

з параметрами налаштування ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань –

питомою швидкістю  $\nu$  непрямої корекції для приведення головної осі гіроскопа в площину меридіану в напрямку на Північ і питомою швидкістю  $\nu \varepsilon$  горизонтальної корекції для заспокоюванням власних коливань, де:

$$\nu = \frac{k}{H}; \quad \varepsilon = \frac{k'}{k}; \quad \varepsilon \ll 1;$$

$k, k'$  – крутизна характеристик непрямої і горизонтальної корекції відповідно;  $\varepsilon$  – коефіцієнт послаблення горизонтальної корекції;  $H$  – власний кінетичний момент гіроскопа;  $U_3$  – кутова швидкість власного добового обертання Землі;  $\varphi$  – широта місцезнаходження об'єкта з ГК.

Параметри власних незгасаючих коливань ГК – кругова частота  $\omega_0$ , період  $T_0$ , постійна часу  $\tau$ :

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{U_3 \cos \varphi (\nu + U_3 \cos \varphi)}; \\ T_0 &= \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{U_3 \cos \varphi (\nu + U_3 \cos \varphi)}}; \\ \tau &= \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{U_3 \cos \varphi (\nu + U_3 \cos \varphi)}}. \end{aligned}$$

Параметри згасаючих коливань ГК – коефіцієнт демпфування  $h$ , відносний коефіцієнт згасання  $\zeta$ :

$$\begin{aligned} h &= \frac{\nu \varepsilon}{2} = \zeta \omega_0 = \frac{2\pi \zeta}{T_0} = \frac{\zeta}{\tau}; \\ \zeta &= \frac{\nu \varepsilon \tau}{2} = h \tau = \frac{h}{\omega_0} = \frac{h T_0}{2\pi}. \end{aligned}$$

Отже, ГК з непрямым керуванням є коливальною системою. Залежно від умов налаштування, можливі такі властивості ГК, за яких головна вісь гіроскопа буде здійснювати згасаючі коливання в площині горизонту відносно напрямку на Північ або буде приводитись в площину меридіану в напрямку на Північ аперіодично. У такий спосіб, якщо на заданій широті  $\varphi_0$  місцезнаходження об'єкта при налаштуванні ГК вибрати питому швидкість  $\nu$  непрямої корекції та коефіцієнт  $\varepsilon$  послаблення горизонтальної корекції для заспокоюванням коливань такими, що

$$\nu^2 \varepsilon^2 = 4U_3 \cos \varphi_0 (\nu + U_3 \cos \varphi_0);$$

то будуть виконуватись умови

$$h = \omega_0; \quad \zeta = 1;$$

при яких рішення  $\alpha = f(t)$  другого диференціального рівняння руху ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань

$$\alpha = C_1 e^{-\frac{1}{2\nu \varepsilon t}} + C_2;$$

де  $C_1, C_2$  – постійні, отримані при інтегруванні диференціального рівняння. Постійна  $C_1$  визначається при початкових умовах, постійна  $C_2$  визначається при кінцевих умовах. Отже, за вказаних умов налаштування головна вісь гіроскопа

ГК буде приводитись в площину меридіану в напрямку на Північ аперіодично:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\frac{1}{2}\nu\epsilon t} + \Delta\alpha;$$

де:  $\alpha_0$  – значення початкового кута відхилення головної осі гіроскопа від напрямку на Північ при  $t=0$ , відраховується в площині горизонту;  $\Delta\alpha$  – значення кута відхилення головної осі гіроскопа в площині горизонту від напрямку на Північ в усталеному режимі, коли  $\dot{\alpha} = 0$ .

При переміщенні об'єкта з ГК в напрямку на Південь від широти  $\varphi_0$ , на якій здійснювалося вказане вище налаштування, будуть виконуватись умови:

$$\begin{aligned} \nu^2 \epsilon^2 < 4U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi); \\ h < \omega_0; \quad \zeta < 1; \end{aligned}$$

при яких головна вісь гіроскопа ГК буде здійснювати згасаючі коливання відносно напрямку на Північ:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\frac{1}{2}\nu\epsilon t} \cos(\omega t) + \Delta\alpha.$$

Параметри згасаючих коливань ГК – кругова частота  $\omega$ , період  $T$  і логарифмічний декремент  $\delta$ :

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi) - \nu^2 \epsilon^2 / 4} = \\ &= \sqrt{\omega_0^2 - h^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi) - \nu^2 \epsilon^2 / 4}} = \\ &= \frac{T_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}}; \end{aligned}$$

$$\delta = hT = \frac{2\pi h}{\sqrt{U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi) - \nu^2 \epsilon^2 / 4}} = \frac{hT_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}}.$$

При переміщенні об'єкта в напрямку на Північ від заданої вище широти  $\varphi_0$  будуть виконуватись умови:

$$\begin{aligned} \nu^2 \epsilon^2 > 4U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi); \\ h > \omega_0; \quad \zeta > 1; \end{aligned}$$

при яких головна вісь гіроскопа буде приводитись в площину меридіану в напрямку на Північ аперіодично:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 \left[ e^{-\frac{1}{2}\left(\nu\epsilon + \frac{1}{2}\sqrt{\nu^2\epsilon^2 - 4U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi)}\right)t} + \right. \\ &\left. + e^{-\frac{1}{2}\left(\nu\epsilon - \frac{1}{2}\sqrt{\nu^2\epsilon^2 - 4U_3 \cos \phi (\nu + U_3 \cos \phi)}\right)t} \right] + \Delta\alpha. \end{aligned}$$

Отже, ГК з непрямым електромагнітним керуванням, із заспокоюванням власних коливань ослабленою горизонтальною корекцією з коефіцієнтом ослаблення  $\epsilon$ , є електромеханічним аналогом маятникового ГК з ексцентричним підвісом з ексцентриситетом  $\epsilon$ , але з іншими динамічними властивостями завдяки використанню врівноваженого (астатичного) гіроскопа.

ГК з непрямым керуванням є простим для налаштування приладом, його параметри визначаються і змінюються визначенням і зміною коефіцієнтів передачі (коефіцієнтів підсилення)  $k$  в ланцюгу прямої корекції для приведення головної осі гіроскопа в площину меридіану в напрямку на Північ і  $k'$  в ланцюгу горизонтальної корекції для заспокоювання власних коливань.

Для певної широти місцезнаходження об'єкта можна налаштувати ГК так, що головна вісь гіроскопа буде приводитись в площину меридіану в напрямку на Північ аперіодично, без коливань.

#### Похибки гіроскопічного компаса з непрямым керуванням

Постійне значення  $C_2$ , яке визначається при кінцевих умовах в усталеному режимі ГК, коли  $\dot{\alpha}=0$ , є значенням кута  $\Delta\alpha$  відхилення головної осі гіроскопа від напрямку на Північ, тобто, значенням похибок ГК. Для визначення похибок ГК з непрямым керуванням можна скористатися загальними технічними рівняннями руху триступеневого астатичного гіроскопа і технічними рівняннями руху ГК з непрямым керуванням із заспокоюванням власних коливань:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} - U_3 \cos \phi \cdot \beta + U_3 \sin \phi = -\frac{M_x}{H}; \\ \dot{\beta} + U_3 \cos \phi \cdot \alpha = \frac{M_z}{H}; \\ \begin{cases} \dot{\alpha} - U_3 \cos \phi \cdot \beta + U_3 \sin \phi = \nu\beta; \\ \dot{\beta} + U_3 \cos \phi \cdot \alpha = -\nu\epsilon\beta; \end{cases} \end{cases}$$

де:  $M_x$  і  $M_z$  – моменти відносно горизонтальної осі внутрішньої рамки і вертикальної осі зовнішньої рамки підвісу гіроскопа відповідно.

Нехай:  $\omega_{др(x)}$  і  $\omega_{др(z)}$  – шкідливі власні дрейфи гіроскопа відносно горизонтальної осі та вертикальної осі підвісу відповідно, наприклад, через незбалансованість оберальної системи підвісу;  $M_{зб(x)}$  і  $M_{зб(z)}$  – шкідливі моменти збурень відносно горизонтальної осі та вертикальної осі підвісу відповідно, наприклад, через тертя в опорах підвісу;  $\Delta\alpha$  і  $\Delta\beta$  – похибки ГК з непрямым керуванням в усталеному режимі, відхилення головної осі гіроскопа в площині горизонту від напрямку на Північ і відхилення від площини горизонту відповідно. Тоді, для усталеного режиму ГК, коли  $\dot{\alpha} = 0$ , технічні рівняння похибок ГК, згідно рівнянь руху, визначаються як:

$$\begin{cases} \omega_{др(z)} - U_3 \cos \phi \cdot \Delta\beta + U_3 \sin \phi = v \cdot \Delta\beta - \frac{M_{зб(x)}}{H}; \\ \omega_{др(x)} + U_3 \cos \phi \cdot \Delta\alpha = -v\epsilon \cdot \Delta\beta + \frac{M_{зб(z)}}{H}. \end{cases}$$

Звідси, похибка  $\Delta\alpha_{ГК}$  ГК з непрямым керуванням з заспокоюванням власних коливань, при приведенні головної осі гіроскопа в площину меридіану в напрямку на Північ (N), визначається як:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{ГК} = \Delta\alpha_N = \Delta\alpha = & \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot M_{зб(z)} - \\ & - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{др(x)} - \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{U_3 \cos \phi} \times \\ & \times \frac{v\epsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot M_{зб(x)} - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v\epsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{др(z)} - \\ & - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v\epsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot U_3 \sin \phi. \end{aligned}$$

Отже, враховуючи те, що  $\epsilon \ll 1$ , критичними для ГК з непрямым керуванням є перші дві складові похибок – похибка, викликана власним дрейфом  $\omega_{др(x)}$  гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу і похибка, викликана збуренням  $M_{зб(z)}$  відносно вертикальної осі підвісу.

При переключенні з режиму ГК в режим ГН, головна вісь гіроскопа зберігає свій напрямок на Північ, попередньо визначений в режимі ГК. Похибка  $\Delta\alpha_{ГН}$  ГН зберігання визначеного азимутального напрямку накопичується з плином часу  $t$  як [31]:

$$\Delta\alpha_{ГН} = -\frac{1}{H} M_{зб(x)} \cdot t - \omega_{др(z)} \cdot t - U_3 \sin \phi \cdot t.$$

Вище визначені рівняння похибок ГК і ГН є загальними, з яких випливають наступні висновки.

Похибки ГК із непрямым керуванням в усталеному режимі викликають: вертикальна складова  $U_3 \sin \phi$  кутової швидкості власного обертання Землі; шкідливі власні дрейфи гіроскопа відносно осей підвісу; шкідливі збурення відносно осей підвісу. Критичними для ГК із непрямым керуванням є власний дрейф гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу та збурення відносно вертикальної осі підвісу.

Похибки ГН зберігання азимутального напрямку викликають: вертикальна складова  $U_3 \sin \phi$  кутової швидкості власного обертання Землі, шкідливий власний дрейф гіроскопа відносно вертикальної осі підвісу; шкідливі збурення відносно горизонтальної осі підвісу, які, на відміну від ГК, є критичними для ГН.

Для належної роботи ГК і ГН необхідна компенсація систематичного шкідливого дрейфу гіроскопа, викликаного вертикальною складовою  $U_3 \sin \phi$  кутової швидкості власного обертання Землі, постійною складовою власного дрейфу гіроскопа,

постійною складовою дрейфу від збурень – відносно вертикальної та горизонтальної осей підвісу для ГК, відносно вертикальної осі підвісу для ГН.

### Гіроскопічний компас з непрямым керуванням на основі динамічно налаштованого гіроскопа

Кінематична схема ГК, на основі ДНГ, з вертикальною віссю підвісу, на стабілізованій в площині горизонту платформі, з системою азимутальної стабілізації чутливого елемента ДНГ, системою непрямого керування і системою заспокоювання власних коливань ГК, представлена на кресленку (рис. 10). Режим ГК застосовується при стоянці (зупинці) рухомого об'єкта, режим ГН застосовується при русі та при стоянці (зупинці) об'єкта.

Стабілізація платформи в площині горизонту здійснюється не пов'язаними з ГК засобами. Стабілізація чутливого елемента ДНГ в азимутальному напрямку відносно вертикальної осі підвісу здійснюється системою азимутальної стабілізації. Робота систем горизонтальної та азимутальної стабілізації тут і далі не розглядається.

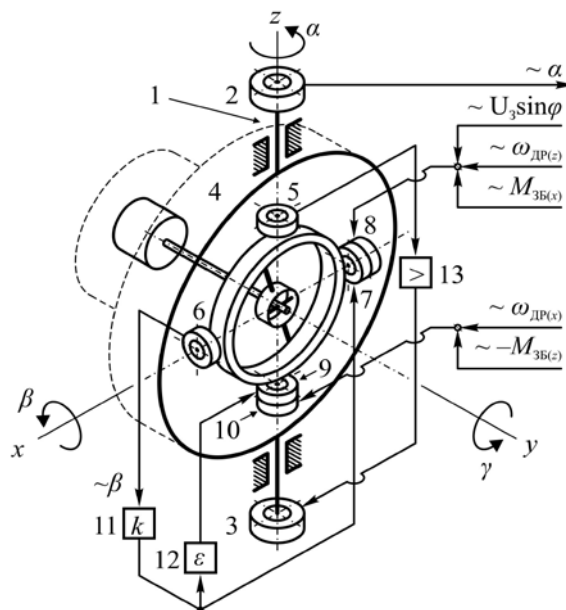


Рис. 10. Кінематична схема ГК на основі ДНГ, де: 1 – вертикальна вісь підвісу; 2 – датчик кута азимутальний ДК<sub>А</sub>; 3 – датчик моменту азимутальний ДМ<sub>А</sub>; 4 – динамічно налаштований гіроскоп (ДНГ); 5 – датчик кута ДНГ вертикальний ДК<sub>В</sub>; 6 – датчик кута ДНГ горизонтальний ДК<sub>Г</sub>; 7 – датчик моменту ДНГ основний ДМ<sub>10</sub>; 8 – датчик моменту ДНГ компенсаційний ДМ<sub>1К</sub>; 9 – датчик моменту ДНГ основний ДМ<sub>20</sub>; 10 – датчик моменту ДНГ компенсаційний ДМ<sub>2К</sub>; 11 – підсилювач системи непрямого керування; 12 – елемент системи заспокоювання коливань; 13 – підсилювач азимутальної стабілізації

У такий спосіб, ГК з непрямым керуванням для наземних рухомих об'єктів, порівняно з морським коректованим ГК, має спрощену схему (як і наземний маятниковий ГК, порівняно з морським маятниковим ГК), з однією вертикальною віссю підвісу триступеневого чутливого елемента ДНГ. Отже, відсутність горизонтальної осі карданового підвісу практично нівелює критичні чинники, які значно визначають похибки ГН. Отримується порівняно якісний ГН, похибки якого визначаються систематичним і випадковим власним дрейфом чутливого елемента з внутрішнім кардановим підвісом ДНГ. Вертикальна складова  $U_3 \sin \phi$  кутової швидкості власного обертання Землі і значний власний систематичний дрейф чутливого елемента ДНГ відносно вертикальної осі підвісу, до  $3^\circ/\text{год}$  [56], вимагають, як було зазначено в попередньому розділі, їх компенсації в режимі ГН і в режимі ГК. Визначення вертикальної складової  $U_3 \sin \phi$  кутової швидкості власного обертання Землі і складової власного систематичного дрейфу відносно вертикальної осі підвісу не є технічною проблемою. Оскільки ГН є вільним відносно вертикальної осі підвісу, достатньо в будь-який час, при відомій широті  $\phi$  місцезнаходження об'єкта, при нерухомій основі об'єкта, визначити в режимі ГН швидкість зміни кута  $\alpha$ , інформація про який надається з датчика кута азимутального. Компенсацію вказаних складових можливо здійснювати апаратно (для режиму ГК і режиму ГН), подаючи відповідне пропорційне збудження на компенсаційний датчик моменту ДНГ відносно горизонтальної осі, або програмно (лише для режиму ГН, враховуючи його вільність відносно вертикальної осі підвісу), перераховуючи в ЕОМ по відповідним алгоритмам значення кута  $\alpha$ , отримане з азимутального датчика кута.

У режимі ГК чутливий елемент не є вільним, система непрямого керування і система заспокоювання коливань працюють як слідкуючі системи. Через те, що в режимі ГН чутливий елемент також не є вільним відносно горизонтальної осі внутрішнього карданового підвісу ДНГ, система горизонтальної корекції ГН працює як слідкуюча система, визначити складову власного дрейфу чутливого елемента відносно горизонтальної осі, для її подальшої компенсації, прямим способом (вимірюванням) практично неможливо.

Наразі для ГК із непрямым керуванням на основі ДНГ на стабілізованій платформі з урахуванням загальної моделі похибок ГК (див. попередній підрозділ) можна визначити наступні висновки.

Компенсація вертикальної складової  $U_3 \sin \phi$  кутової швидкості власного обертання Землі і систематичної складової власного дрейфу чутливого елемента відносно вертикальної осі підвісу в режимі ГН і в режимі ГК може здійснюватися простими технічними засобами, причому в режимі ГН

апаратно або програмно, в режимі ГК лише апаратно.

Існує технічна проблема визначення прямим способом (вимірюванням) систематичної складової дрейфу чутливого елемента відносно горизонтальної осі для її подальшої компенсації в режимі ГК.

Відсутність зовнішньої горизонтальної осі підвісу чутливого елемента ДНГ дозволяє використовувати ГН, на стабілізованій в площині горизонту платформі, порівняно тривалий час, причому похибка ГН практично визначається власним випадковим дрейфом чутливого елемента відносно вертикальної осі підвісу.

#### **Компенсація власного дрейфу чутливого елемента відносно горизонтальної осі**

Отже, прямим способом можна виміряти складові дрейфу гіроскопа відносно вертикальної осі підвісу для компенсації таких систематичних похибок ГК:

$$\Delta \alpha_K = -\frac{1}{H} \cdot \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v \varepsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot M_{зб(x)}^{сист} - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v \varepsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{др(z)}^{сист} - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v \varepsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot U_3 \sin \phi.$$

Існує технічна проблема визначення складових дрейфу гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу для компенсації таких систематичних похибок ГК, які є критичними (див. висновок 4) для ГК:

$$\Delta \alpha_H = \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot M_{зб(z)}^{сист} - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{др(x)}^{сист}.$$

Отже, необхідно у непрямий спосіб практично визначити складові  $\Delta \alpha_H$  і компенсувати їх, можливість чого поки не є очевидною.

У ГК із непрямым керуванням головна вісь гіроскопа має два напрямки рівноваги, напрямом стійкої рівноваги на Північ і напрямом нестійкої рівноваги на Південь. Нехай, на виконавчому пристрої системи непрямого керування, на основному датчику моменту ДНГ відносно горизонтальної осі, проведена комутація фаз, тобто, проведена зміна полюсів живлення. Відповідно змінюються напрямки рівноваги, напрямом на Південь змінюється на напрямом стійкої рівноваги, напрямом на Північ стає напрямком нестійкої рівноваги.

Тоді технічні рівняння руху ГК, технічні рівняння похибок ГК і рівняння похибки ГК при приведенні головної осі гіроскопа в площину меридіану в напрямку на Південь (S) визначаються як:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} + U_3 \cos \phi \cdot \beta + U_3 \sin \phi = -\frac{M_x}{H}; \\ \dot{\beta} - U_3 \cos \phi \cdot \alpha = \frac{M_z}{H}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\alpha} + U_3 \cos \phi \cdot \beta + U_3 \sin \phi = -v\beta; \\ \dot{\beta} - U_3 \cos \phi \cdot \alpha = -v\epsilon\beta; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_{др(z)} + U_3 \cos \phi \cdot \Delta\beta + U_3 \sin \phi = -v \cdot \Delta\beta - \frac{M_{зб(z)}}{H}; \\ \omega_{др(x)} - U_3 \cos \phi \cdot \Delta\alpha = -v\epsilon \cdot \Delta\beta + \frac{M_{зб(x)}}{H}; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{ГК} = \Delta\alpha_s = \Delta\alpha = & -\frac{1}{H} \cdot \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot M_{зб(z)} + \\ & + \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{др(x)} - \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v\epsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot M_{зб(x)} - \\ & - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v\epsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{др(z)} - \\ & - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v\epsilon}{v + U_3 \cos \phi} \cdot U_3 \sin \phi. \end{aligned}$$

Таким чином, похибки  $\Delta\alpha_K$ , які викликаються складовими дрейфу гіроскопа відносно вертикальної осі підвісу, при приведенні головної осі гіроскопа в площину меридіану в напрямку на Північ і Південь визначаються з одним і тим же знаком, а похибки  $\Delta\alpha_H$ , які викликаються складовими дрейфу гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу, при приведенні головної осі гіроскопа в напрямку на Південь змінюють свій знак на протилежний по відношенню до похибок при приведенні головної осі гіроскопа в напрямку на Північ:

$$\Delta\alpha_N = \Delta\alpha_H + \Delta\alpha_K;$$

$$\Delta\alpha_S = -\Delta\alpha_H + \Delta\alpha_K.$$

У такий спосіб, проводячи в режимі ГК, із застосуванням відомого способу компенсації систематичних похибок  $\Delta\alpha_K$  (див. попередній підрозділ), два послідовних вимірювання значень азимутального напрямку заданої осі  $O$  об'єкта (рис. 11) – значення  $A_N$  при приведенні головної осі гіроскопа в напрямку на Північ і значення  $A_S$  при приведенні головної осі гіроскопа в напрямку на Південь:

$$\Delta A_N = A + \Delta\alpha_H;$$

$$\Delta A_S = A \pm 180^\circ - \Delta\alpha_H;$$

істинний азимутальний напрямку  $A$  заданої осі об'єкта можна визначити у спосіб, індіферентний до похибок  $\Delta\alpha_H$ , а саме як:

$$A = \frac{1}{2}(\Delta A_N + \Delta A_S) - 90^\circ, \text{ при } \Delta A_N < \Delta A_S;$$

$$A = \frac{1}{2}(\Delta A_N + \Delta A_S) + 90^\circ, \text{ при } \Delta A_N > \Delta A_S.$$

У такий самий спосіб можна визначити похибку  $\Delta\alpha_H$ :

$$\Delta\alpha_H = \frac{1}{2}(\Delta A_N - \Delta A_S) - 90^\circ, \text{ при } \Delta A_N < \Delta A_S;$$

$$\Delta\alpha_H = \frac{1}{2}(\Delta A_N - \Delta A_S) + 90^\circ, \text{ при } \Delta A_N > \Delta A_S.$$

Отже, тепер очевидно, що при двох послідовних вимірюваннях значень заданого азимутального напрямку при прямій і зворотній полярності живлення виконавчого пристрою системи непрямого керування ГК, із застосуванням відомого апаратного способу компенсації систематичних похибок  $\Delta\alpha_K$ , можливо визначити та компенсувати систематичні похибки  $\Delta\alpha_H$ , складові яких технічно неможливо визначити прямим вимірюванням, або іншим способом.

Компенсацію систематичної похибки  $\Delta\alpha_H$  можливо просто здійснити апаратно, визначивши при налаштуванні ГК відповідне постійне збудження на компенсаційний датчик моменту ДНГ відносно вертикальної осі так, що при контрольному вимірюванні значення  $\Delta\alpha_H=0$  або менше допустимого значення.

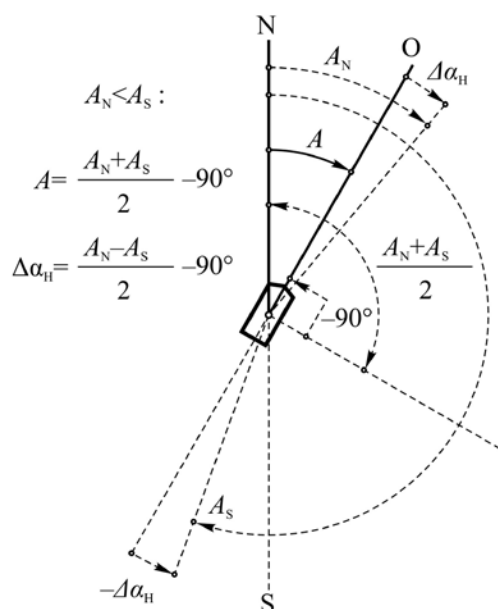


Рис. 11. Похибки ГК при приведенні головної осі гіроскопа в напрямку на Північ (N) і Південь (S)

У підсумку можна дійти наступних висновків.

Здійснення компенсації критичних для ГК з непрямою корекцією систематичних складових власного дрейфу чутливого елемента відносно горизонтальної осі та збудження відносно

вертикальної осі підвісу є можливим при застосуванні методики непрямих вимірювань при налаштуванні ГК, двох послідовних вимірювань азимутального напрямку при приведенні головної осі гіроскопа в напрямку на Північ і Південь.

Методика послідовних вимірювань, при приведенні головної осі чутливого елемента в напрямку на Північ і в напрямку на Південь, може застосовуватись в певних випадках як один із можливих і ефективних інструментів підвищення точності визначення істинного (географічного) азимуту заданого напрямку.

### Оцінка параметрів гіроскопічного компаса з непрямим керуванням

Граничні значення випадкового власного дрейфу чутливого елемента типових ДНГ, наприклад типу ГВК (ГВК-6, ГВК-18), складають від  $0,01^\circ/\text{год}$  до  $0,03^\circ/\text{год}$  відносно вертикальної осі, і від  $0,02^\circ/\text{год}$  до  $0,056^\circ/\text{год}$  відносно горизонтальної осі ГВК [56]. Отже, ймовірний випадковий власний дрейф відносно вертикальної осі, критичний для ГН, може бути в два рази менше ймовірного випадкового власного дрейфу відносно горизонтальної осі, який є критичним для ГК, що є додатковим аргументом використання порівняно тривалий час режиму ГН при рухомому і не рухомому об'єкті. Через відсутність горизонтального зовнішнього підвісу чутливого елемента з внутрішнім кардановим підвісом, похибки ГН на основі ДНГ, на стабілізованій в площині горизонту платформі, практично визначаються власним випадковим дрейфом чутливого елемента відносно вертикальної осі підвісу, при застосуванні ДНГ типу ГВК – граничними значеннями від  $0,01^\circ/\text{год}$  до  $0,03^\circ/\text{год}$ .

Випадкова похибка ГК з непрямим керуванням із заспокоюванням власних коливань, викликана випадковим дрейфом чутливого елемента, з урахуванням того, що  $\varepsilon \ll 1$ :

$$\Delta\alpha_{\text{ГК}}^{\text{вип}} = -\frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{\text{др}(x)}^{\text{вип}} - \frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \frac{v\varepsilon}{v + U_3 \cos \phi} \times \\ \times \omega_{\text{др}(z)}^{\text{вип}} \approx -\frac{1}{U_3 \cos \phi} \cdot \omega_{\text{др}(x)}^{\text{вип}} = -\frac{\omega_{\text{др}(x)}^{\text{вип}}}{U_3} \cdot \sec \phi.$$

Таким чином, при застосуванні ДНГ типу ГВК, граничні значення похибки ГК, викликані власним дрейфом чутливого елемента, можуть скласти від  $0,08^\circ$  до  $0,21^\circ$  на екваторі та від  $0,22^\circ$  до  $0,63^\circ$  на широті  $\phi=70^\circ$ , або від  $0,12^\circ$  до  $0,33^\circ$  на широті  $\phi=50^\circ$ .

Для ГК із непрямим керуванням мінімальне значення  $T_0$  періоду незгасаючих коливань можна забезпечити вибором максимального значення питомої швидкості  $v$  непрямой корекції, а необхідне значення відносного коефіцієнта  $\zeta$  згасання коливань можна забезпечити вибором відповідного

значення коефіцієнта  $\varepsilon$  послаблення горизонтальної корекції, яка застосовується для заспокоювання власних коливань ГК. Так, наприклад, при значенні  $v=2\pi \text{ c}^{-1}$  питомої швидкості непрямой корекції, яке може бути забезпечене в ГК на основі ДНГ, період власних незгасаючих коливань на екваторі  $T_0=4,89 \text{ хв}$ , на широті  $\phi=70^\circ$   $T_0=8,38 \text{ хв}$ , на широті  $\phi=50^\circ$   $T_0=6,11 \text{ хв}$ .

Для забезпечення при налаштуванні ГК значення відносного коефіцієнта  $\zeta=1$ , при якому головна вісь чутливого елемента буде приводитись в площину меридіану в напрямку на Північ аперіодично, необхідно забезпечити значення коефіцієнта послаблення горизонтальної корекції при налаштуванні ГК на екваторі  $\varepsilon=0,0068$ , на широті  $\phi=50^\circ$   $\varepsilon=0,0055$ , на широті  $\phi=70^\circ$   $\varepsilon=0,004$ .

Отже, при оцінці параметрів ГК, період незгасаючих коливань ГК з непрямим керуванням на певній широті місцезнаходження об'єкта визначається крутизною характеристики системи непрямой керування – вибраним при налаштуванні ГК коефіцієнтом підсилення в ланцюгах непрямой корекції. Період згасаючих коливань визначається крутизною характеристики системи заспокоювання коливань – вибраним коефіцієнтом підсилення в ланцюгах горизонтальної корекції.

Проведена якісна (в попередніх підрозділах) і кількісна (в даному підрозділі) оцінка параметрів дозволяє зробити висновок, що ГН і ГК з непрямим керуванням на основі ДНГ, на стабілізованій в площині горизонту платформі, потенційно є приладом навігаційного класу (середнього класу точності).

### Висновки

Проведене оригінальне дослідження історії створення і розвитку ГК з непрямой корекцією несе гуманітарне, а також можливе полемічне навантаження і може бути корисним для фахівців і студентів, науковців і інженерів, для всіх, хто цікавиться розвитком гіроскопічних приладів і систем.

При дослідженні ГК з непрямим керуванням для наземних рухомих об'єктів на основі ДНГ на стабілізованій в площині горизонту платформі визначені загальні моделі похибок ГК при приведенні головної осі гіроскопа в площину меридіану в напрямку на Північ і в напрямку на Південь. Вирішена проблема визначення і компенсації власного систематичного дрейфу гіроскопа відносно горизонтальної осі підвісу через методику непрямих вимірювань.

Подальші дослідження ГК з непрямим керуванням на стабілізованій платформі можуть бути направлені на актуальні аналіз і розробку методик компенсації похибок ГК, які порівняно повільно змінюються з плином часу, і зменшення значних швидкоплинних похибок ГК, які виникають від випадкових збурень.



**Література**

- [1] Leonhard Euler, "Recherches sur la précession des équinoxes, et sur la nutation de l'axe de la terre", in *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 5 (1749), 1751, pp. 289-325.
- [2] Johann G. F. Bohnenberger, "Beschreibung einer Maschine zur Erläuterung der Gesetze der Umdrehung der Erde um ihre Axe, und der Veränderung der Lage der letzteren", *Tübinger Blätter für Naturwissenschaften und Arzneikunde*, vol. 3, 1817, pp. 72-83.
- [3] "Instrument de démonstration en mécanique (polytrophe de Sire)", in *Inventaire général du patrimoine culturel de Besançon Réf. Palissy IM25001974*. Paris: Ministère de la Culture République Française, 2007.
- [4] E.S. Snell, "On Planetary Disturbances", in *Annual Report of the Board of Regents of Smithsonian*. Washington: Cornelius Wendell Printer, 1856, pp. 175-190.
- [5] William Tobin, *The Life and Science of Léon Foucault: The Man Who Proved the Earth Rotates.*, apps., notes, index. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 338 p.
- [6] W.R. Johnson, "Description of the Rotascope", in *American Journal of Science and Arts*. January, 1832. 265 p.
- [7] Режим доступу: <https://www.yourdictionary.com/rotascope>
- [8] К. Магнус, "К истории применения гироскопов в Германии", в *История механики гироскопических систем*. Москва, СССР: Наука, 1975, с. 94-114.
- [9] Oscar Martienssen, "Die Verwendbarkeit des Rotationskompasses als Ersatz des magnetischen Kompasses", *Physikalische Zeitschrift*, Vol. 7, No. 15. Leipzig: S. Hirzel Verlag, 1906, pp. 535-543.
- [10] Edward Sang, "Suggestion of a new experiment whereby the rotation of the Earth may be demonstrated", *The Edinburgh New Philosophical Journal*, vol. 21, 1836. 164 p.
- [11] M. Léon Foucault, "Démonstration expérimentale du mouvement de la terre. Addition aux communications faites dans les précédentes séances" (Extrait du Journal des Débats du mercredi 22 septembre 1852) in *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, Paris: Bachelier, Vol. 35, 1852, pp. 175-190.
- [12] Ю. Ф. Лазарев, П. М. Бондар, *Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації*. Київ, Україна: НТТУ «КПІ», 2011, с. 423-438.
- [13] И. Д. Блюмин, А. И. Ишлинский, "Теория гироскопических и инерциальных систем", в *История механики с конца XVIII до середины XX века*. Глава 5, А. Е. Григорьян, И. Б. Погребыский, Ред. . Москва, СССР: Наука, 1972, с. 138-189.
- [14] William Thomson, *Gyrostatic Model of a Magnetic compass*. Nature, 1884. 524 p.
- [15] Edm. P. Dubois, "Sur le gyroscope marin", *C. R. Acad. Sc.*, vol. 98, n. 4. Paris, 1884, p. 227.
- [16] Sir William Thomson, Peter Guthrie Tait, *Treatise on Natural Philosophy*. Cambridge: At the University Press, 1879. 508 p.
- [17] A. Föppl, "Über einen Kreisversuch zur Messung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde", *Physikalische Zeitschrift*, No. 5. Leipzig: S. Hirzel Verlag, pp. 416-425, 1904.
- [18] Jobst Broelmann, "Hermann Anschütz-Kämpfe – Richtungsweiser ohne Spuren", *Deutsches Schiffsarchiv*, No. 25, pp. 41-55, 2002. <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/50360>
- [19] H. Anschütz-Kämpfe, "Der Kreisels als Richtungsweiser auf der Erde mit besonderer Berücksichtigung seiner Verwendbarkeit auf Schiffen", *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, No. 10, pp. 352-369, 1909.
- [20] M. Schuler, "Mathematischer Anhang", *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, No. 10, pp. 561-576, 1909.
- [21] *Sperry Gyro-Compass and Navigation Equipment*. New York, U.S.A.: The Sperry Gyroscope Company, 1912.
- [22] А.А. Одинцов, *Теория и расчет гироскопических приборов*. Київ, СРСР: Вища школа, 1985, с. 109-172.
- [23] Я.Н. Ройтенберг, *Гироскопы*. Москва, СССР: Наука, 1966.
- [24] C. T. Davenport, "The Gyrocompass", in *Gyroscopes: Theory and Design*. Chapter 5, P.H. Savet (editor) New York: McGraw-Hill Book Co., 1961.
- [25] П.П. Коптяев, "Двухрежимный гироскопический компас с электромагнитной коррекцией и аперидическим привидением гироскопа в меридиан", в *Вопросы прикладной гироскопии, сборник докладов. Выпуск 2*. Ленинград, СССР: Судпромгиз, 1960, с. 123-146.
- [26] В.М. Митник, "Новый способ демпфирования собственных колебаний гироскопа с электромагнитным управлением", *Труды ЦНИИМФ, сборник докладов*, вып. 30. Ленинград, СССР: Морской транспорт, 1960.
- [27] С. С. Ривкин, *Теория гироскопических устройств. Часть II*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1964.
- [28] В. М. Коган, В. А. Проскурин, В. А. Тымчур, "Двухрежимный гироскопический компас", Описание изобретения. *Бюллетень изобретений*, № 36. Москва, СССР: ЦБТИ, 1962.
- [29] С. С. Ривкин, *Статистический синтез гироскопических устройств*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1970.
- [30] М. М. Богданович, П. А. Ильин, *Гироскопические устройства и приборы*. Ленинград, СССР: Судпромгиз, 1961.
- [31] А. А. Одинцов, *Теория и расчет гироскопических приборов*. Київ, СРСР: Вища школа, 1985, с. 18-68.

- [32] П.М. Бондарь, В.В. Мелешко, *Гироскопы направления : монография*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15794>
- [33] Felix Klein, Arnold Sommerfeld, "Technical Applications of the Theory of the Top", in *The Theory of the Top, Volume IV*. Translated by Raymond J. Nagem and Guido Sandri. New York: Springer Science + Business Media, 2014, pp. 965-967.
- [34] Narciss Ach, of Marburg, Germany, "Gyroscope", Patent 875,036, Serial No. 332,723, Filed Aug. 30, 1906. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Vol. CXXXI. Washington: Government Printing Office, 1908, pp. 2188-2189.
- [35] P.R. Brassett, "Gyroscopic Compass", Patent 1,749,059, Serial No. 630,034, Filed April 5, 1923. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1930.
- [36] R. Haskins, "Jr. Gyro Compass", Patent 2,419,948, Serial No. 485,077, Filed April 29, 1943. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1947.
- [37] G. Agins, "Gyro Compass", Patent 2,968,956, Serial No. 785,910, Filed Nov. 14, 1947. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1961.
- [38] Richard Y. Miner, Charles T. Davenport, Frederic J. Kreitner, "Gyro Compass", Patent 3,049,808, Serial No. 816,411, Filed May 28, 1959. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1962.
- [39] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology*. New York: Springer-Verlag New York, Inc. 1993. 127 p.
- [40] E. W. Howe, "Gyroscope Apparatus", Patent 3,301,073, Serial No. 291,546, Filed June 14, 1963. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1967.
- [41] Морские гироскопы. Справочник. Е. Л. Смирнов, Ред.. Санкт-Петербург, РФ: Элмор, 2002.
- [42] Д. П. Лукьянов, Ю. А. Лесковец, "К истории создания и совершенствования гироскопа", в *Навигация и управление движением: Материалы докладов VIII конференции молодых ученых*. О.А. Степанов (научн. ред.), В.Г. Пошехонов (общ. ред.). Санкт-Петербург, РФ: ГИЦ РФ «Электроприбор», 2007, с. 9-22.
- [43] В.В. Аврутов, А.В. Збруцкий, И.А. Дедок, А.В. Шемелин, В.П. Андрушик, Л.П. Старицкий, "Гироскоп", *Описание изобретения к патенту RU 2000542 С., Бюл. № 33-36*, 1993.
- [44] О. В. Збруцкий, О. І Нестеренко, "Коректований гірокомпас", у *Гироскопы для навігації та наведення. Розділи 1-3*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2017, с. 7-82.
- [45] <https://www.sperrymarine.com/system/files/downloads/ffcd7e4e-7ca1-4b15-b4ea-c8521802d649/NAVIGAT%204000%20SL%20101218%20web%20version.pdf>
- [46] [https://www.ixblue.com/sites/default/files/2020-03/Quadrans\\_2020.pdf](https://www.ixblue.com/sites/default/files/2020-03/Quadrans_2020.pdf)
- [47] <http://pnppk.ru/ru/produktsiya/girokompasy-i-navigatsionnye-sistemy/2-uncategorised/162-girotizontkompas-pgm-v-024>
- [48] <https://www.safran-electronics-defense.com/naval-solutions/commercial-marine/navigation-systems>
- [49] <https://www.raytheon-anschuetz.com/products-systems/product-range/standard-30-mf-gyro-compass/>
- [50] В. А. Голованов, *Гироскопическое ориентирование: учебное пособие*. Санкт-Петербург, РФ: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2004. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://www.studmed.ru/view/golovanov-va-giroskopicheskoe-orientirovanie-ucheb-posobie\\_f0621019378.html](https://www.studmed.ru/view/golovanov-va-giroskopicheskoe-orientirovanie-ucheb-posobie_f0621019378.html)
- [51] Н. Н. Воронков, Н. М. Ашимов, *Гироскопическое ориентирование*. Москва, СССР: Недра, 1973.
- [52] L.R. Ambrosini, "Meridian-Seeking Instrument", Patent 3,512,264, Serial No. 529,325, Filed Feb. 23, 1966. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1970.
- [53] А. С. Довгополий, В. М. Григор'єв, "Прецизійні наземні автоматичні гірокомпаси", у *Гироскопы для навігації та наведення. Розділи 4-6*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2017, с. 83-194.
- [54] [http://arsenalcdb.com.ua/images/pdfs/ua/3\\_2\\_1.pdf](http://arsenalcdb.com.ua/images/pdfs/ua/3_2_1.pdf)
- [55] G. Agins, "Gyro Compass", Patent 2,802,279, Serial No. 663,370, Filed Apr. 19, 1946. *Official Gazette Of The United States Patent Office*, Washington: Government Printing Office, 1957.
- [56] Г. М. Виноградов, В. Л. Будкин, В. М. Соловьев, Н. А. Темляков, К. А. Бахонин, "Чувствительные элементы и автономные средства навигации", на *IV междунар. науч.-техн. конф. Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники*. Сборник докладов. Часть 1. Киев, Украина: НТТУ «КПИ», 2003, с. 9-15.

УДК 629.05

**А. В.Заморский***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

## ГИРОКОМПАС С КОСВЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Данная работа состоит из двух частей. Первая часть является историческим обзором создания двух поколений морских и наземных гироскопов с прямым и косвенным управлением. При обзоре гироскопов с прямым управлением (маятниковых гироскопов), с использованием первоисточников и авторитетных второстепенных источников, выделены основные практические и аналитические разработки, которые привели к созданию первого промышленно применимого морского гироскопа. Обзор гироскопов с косвенным управлением (корректируемых гироскопов) в значительной степени является оригинальным исследованием истоков их создания, проведенным через анализ доступных патентов, учитывая отсутствие других доступных ранних источников. Выделяются разработки по патенту Н. Аха (1906, Германия), в котором, вероятно, впервые появилась схема гироскопа с косвенным управлением, по патенту П. Бассета (1923, США), в котором, вероятно, впервые появилась схема надлежащей настройки гироскопа с косвенным управлением, другие разработки. Рассматриваются также разработки гироскопа с электромагнитной коррекцией П. Коптяева (1932, 1951-1954, СССР) и основные промышленные разработки корректируемых гироскопов на территории бывшего СССР. В обзоре также кратко указаны основные эксплуатационные свойства морских и наземных гироскопов, в том числе гироскопов нового поколения, на основе волоконно-оптических и твердотельных вибрационных гироскопов, инерциальных систем ориентации и указания курса. Из первой части мотивировано следует вторая часть данной работы, в которой исследуется гироскоп с косвенным управлением для наземных подвижных объектов на основе динамически настраиваемого гироскопа на стабилизированной в плоскости горизонта платформе. Определяется общая модель погрешностей такого гироскопа при приведении главной оси гироскопа в плоскость истинного (географического) меридиана в направлении на Север и в направлении на Юг. Представлена схема аппаратной компенсации систематических погрешностей гироскопа. Решается, через косвенные измерения, проблема определения и компенсации собственного дрейфа гироскопа относительно горизонтальной оси подвеса. Проводится оценка параметров гироскопа с косвенным управлением на основе динамически настраиваемого гироскопа, как прибора навигационного класса точности.

**Ключевые слова:** гироскоп, косвенное управление, динамически настраиваемый гироскоп.

### **A. V. Zamorsky**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

## INDIRECT CONTROL GYROCOMPASS FOR LAND MOBILE VEHICLES

This work consists of two parts. The first part is a historical overview of the creation of two generations of marine and land gyrocompasses with direct and indirect control. During the review of pendulum or direct control gyrocompasses, using primary sources and authoritative secondary sources, the main practical and analytical developments that led to the creation of the first industrially applicable marine gyrocompass are highlighted. The review of non pendulum or indirect control gyrocompasses is largely an original study of the origins of their creation that is provided through an analysis of available patents taking into account the lack of other available early sources. There are distinguished the developments according to the patent of Narciss Ach (1906, Germany) where the scheme of the gyrocompass with indirect control probably appeared for the first time, the developments according to the patent of Preston R. Basset (1923, USA), where the scheme of proper tuning of indirect control gyrocompass appeared for the first time, and other developments as well. There are also considered the developments of a gyrocompass with electromagnetic correction by Pavel Koptyaev (1932, 1951-1954, USSR) and the main industrial developments of corrected gyrocompasses in the territory of the former USSR. The review also briefly indicates the main operational properties of marine and land gyrocompasses, including a new generation of gyrocompasses based on fiber-optic gyroscopes (FOG) and hemispherical resonator gyroscopes (HRG), attitude heading reference system (AHRS). The second part of this work reasonably follows from the first part, in which the gyrocompass with indirect control for land mobile vehicles based on a dynamically tuned gyroscope (DTG) on a platform stabilized in the horizon plane is studied. A general model of errors of such gyrocompass is determined, when the main axis of the gyroscope is brought into the plane of the true (geographical) meridian in the direction to the North and in the direction to the South. A hardware compensation scheme for the systematic errors of the gyrocompass is provided. A problem of determining and compensating for the gyroscope own drift relative to the horizontal axis of the suspension is solved through indirect measurements. The estimation of parameters of the indirect control gyrocompass is provided as a device of a navigation accuracy class.

**Keywords:** gyrocompass; indirect control; dynamically tuned gyroscope.

*Надійшла до редакції  
05 травня 2020 року*

*Рецензовано  
18 травня 2020 року*