

2. Король И.И., Черняк С.И., Жук В.Л., Дмитриев О.П., Лампик М.М. Метод решения задачи прицеливания на примере бомбометания с помощью современных авиационных прицельно-навигационных комплексов // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научн-техн. сб. – К.: НТЦ АСВ. – 2003. – Вып.2. – С. 3-7.
3. Справочник летчика и штурмана. Под ред. В.М. Лавского. Военное изд-во Министерства обороны СССР. -М.: 1974 г., 512 с.
4. Локк А.С. Управление снарядами. Государственное изд-во физико-математической литературы.-М.: 1958 г., 776 с.

<p><b>Жук Є.В. Розв'язання задачі прицілювання при бомбометанні за інформацією від супутникових навігаційних систем.</b> Розглянутий метод розв'язання задачі прицілювання в режимі бомбометання для вільно падаючих бомб у випадку, коли авіаційний прицільно-навігаційний комплекс використовує інформацію, як від супутникових навігаційних систем, так і від вимірювальних пристроїв літального апарату.</p>	<p><b>Zhuk E.V. Solving the problem of aiming for free-falling bombs of the information from satellite navigation system.</b> The method of solving the problem of aiming for free-falling bombs in case when aviation aiming navigating system uses information both from satellite navigation system and aircraft measuring devices is given.</p>
--	---

Надійшла до редакції  
15 березня 2004 року

УДК 62-752.4: 528.521

## МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК НАЗЕМНОГО МАЯТНИКОВОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ГІРОКОМПАСУ

*Юр'єв Ю.Ю., Ліхоткін О.М., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

*У статті представлено узагальнену конструктивну схему прецизійного наземного маятникового гірокомпасу, структуру похибки визначення азимуту такого приладу, а також наведено можливі шляхи компенсації та мінімізації похибок визначення азимуту*

### Вступ

Наразі при будівництві та контролі стабільності підземних споруд (тунелі, шахти тощо) існує задача точного азимутального орієнтування. У зв'язку із складністю використання для цієї мети відомих засобів орієнтування від триангуляційної мережі та супутникових систем зростає роль автономних наземних гірокомпасів і гіротеодолітів [1], [2]. Сьогодні існують маятникові гірокомпаси із середньою квадратичною похибкою (СКП) визначення азимута  $3''$  (кут. с). Створення більш точних гірокомпасів стримується можливостями технології. Досвід приладобудування доводить, що в такій ситуації рішення необхідно шукати на шляху компенсації впливу шкідливих факторів на результат вимірювання.

Далі під компенсацією умовно матимемо на увазі наступні види конструкторських та методичних рішень:

а) зміна постійного впливу шкідливого фактору в знакозмінний вплив з подальшим усереднюванням;

б) кількісна оцінка впливу шкідливого фактору та врахування її як коригуючої поправки до результатів;

в) застосування конструктивних рішень, які є вільними від впливу шкідливого фактору.

Метою компенсації є перетворення систематичного впливу шкідливого фактору у випадковий. Якщо всі систематичні похибки скомпенсовані, шляхом збільшення часу та кількості циклів вимірювання, а також вдосконаленням технології виробництва приладів можна звести вплив випадкових похибок до наперед заданого незначного рівня. В сучасних прецизійних гірокомпасах СКП випадкової похибки становить близько  $2,5''$ .

### Постановка завдання

Узагальнену конструктивну схему (рис. 1а) прецизійного гірокомпаса може бути представлена у вигляді нерухомого корпусу 1 із закріпленим на ньому вертикальним дзеркалом (КЕ) 6, азимут якого визначається, і поворотного щодо вертикальної осі гіроблока 4, який встановлено в осьовій системі 9. Гіроблок містить підвішений в ньому маятниковий чутливий елемент (ЧЕ) 2, а також закріплений на ньому фотоелектричний автоколіматор (ФАК) 3 для спостереження відлікового дзеркала 8 ЧЕ.

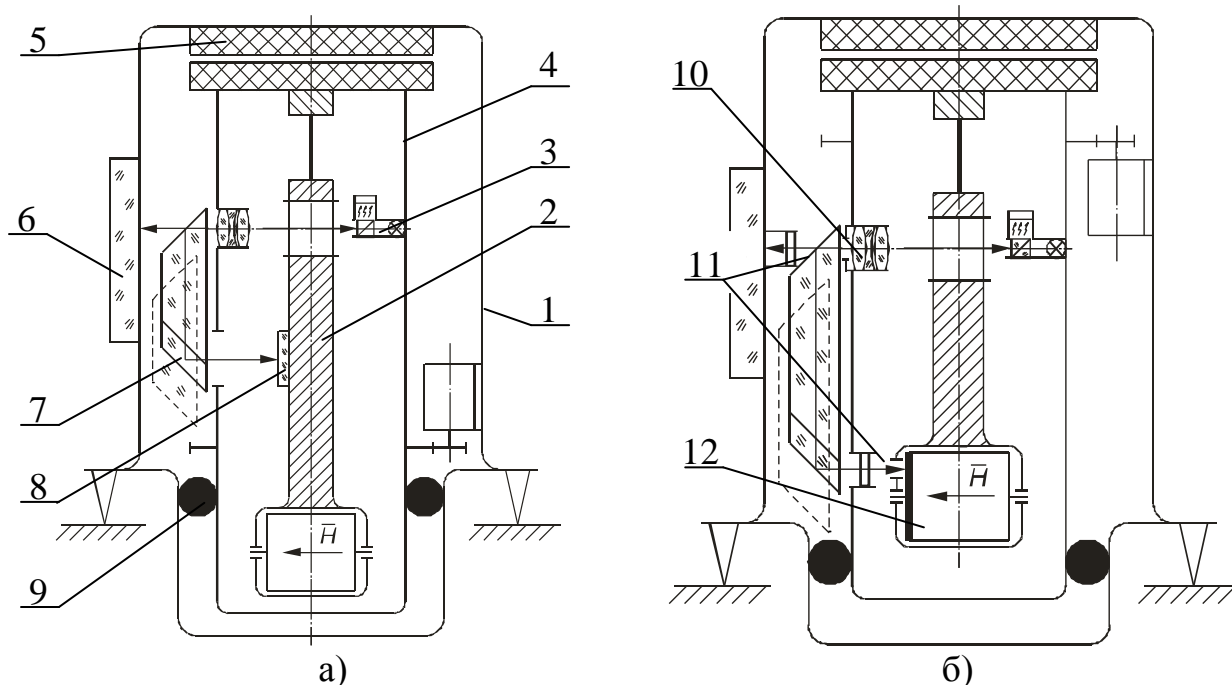


Рисунок 1 – Узагальнена конструктивна схема гірокомпаса

Крім того, прилад містить пристрій вимірювання горизонтальних кутів 5, ротор якого пов'язаний із гіроблоком, а статор з нерухомим корпусом, і оптич-

ний пристрій 7 перемикачів каналів спостереження ФАК (трипель-призма) по черзі на КЕ та відлікове дзеркало ЧЕ.

Такій схемі побудови гірокомпаса притаманна низка інструментальних моментних та геометричних похибок, що мають як випадковий, так і систематичний характер [1]. Моментні похибки виникають внаслідок дії зовнішніх та внутрішніх шкідливих моментів, що впливають на положення власної осі обертання гіромотора в просторі. Геометричні похибки визначаються неточністю визначення цього положення та передачі цієї інформації споживачу.

Останніми роками при загальному зменшенні випадкової складової похибки визначення азимута гірокомпаса, питання щодо підвищення точності вимірювання здебільшого починає зводитися до виключення систематичних похибок, що, в свою чергу, виключає необхідність визначення поправки приладу в експлуатації.

Таким чином, постає задача вибору та розробки методів компенсації систематичних похибок гірокомпаса, що впливають на точність визначення азимуту, та створення гірокомпаса із СКП визначення азимуту  $1''$ , що характеризується переважно випадковими похибками, у перспективі.

### 1. Узагальнена математична модель похибки визначення азимута

При створенні маятникових гірокомпасів на практиці структурний состав інструментальної похибки має складний характер [1]. Поєднанням джерел похибок за статистичними властивостями в загальному вигляді модель похибки визначення азимуту гірокомпаса набуває вигляду:

$$\delta A = \delta_{\text{вип}}^1 + \delta_{\text{вип}}^2 + \delta_{\text{сист}}^1 + \delta_{\text{сист}}^2, \quad (1)$$

де  $\delta A$  – похибка визначення азимуту;  $\delta_{\text{вип}}^1, \delta_{\text{вип}}^2$  – відповідно стаціонарна та не-стаціонарна складові випадкової похибки;  $\delta_{\text{сист}}^1, \delta_{\text{сист}}^2$  – відповідно постійна та змінна складові систематичної похибки.

Стаціонарна випадкова похибка характеризується переважно зміною нуля підвісу після кожного розаретування ЧЕ.

Типовими випадками нестационарних випадкових процесів є всі перехідні теплові процеси, що призводять до зміщення центру мас ЧЕ, конвекції, дрейфу нуля підвісу тощо.

До постійних систематичних похибок відносяться усі незмінні у часі похибки, наприклад, неідеальність виготовлення трипель-призми, клиновидність дзеркал тощо.

Змінні систематичні похибки залежать від температури середовища, точності орієнтування та горизонтування приладу.

### 2 Методи компенсації складових похибки визначення азимуту

Виходячи з моделі (1) прийmemo як характеристику точності дисперсії відповідних складових моделі (1). Тоді для часу проведення прийому  $t$ , довільної кількості прийомів  $n$ , при незмінних зовнішніх умовах отримаємо:

$$D_{\text{аз}} = \frac{1}{n} D_1 + \frac{1}{t} D_2 + D_3 + D_4. \quad (2)$$

Переходячи до СКП, на основі (2) отримаємо:

$$\sigma_{az}^2 = \frac{1}{n} \sigma_1^2 + \frac{1}{t} \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2. \quad (3)$$

З метою зменшення впливу на точність визначення азимута систематичної складової похибки на практиці при еталонуванні (еталонування - визначення приладної поправки при атестації гірокомпаса на еталонному напрямку [1]) в заводських умовах та під час кожного циклу вимірювання в експлуатації визначають приладну поправку [1], що змінює структуру похибки наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma_{az}^2 &= \frac{1}{n} \sigma_1^2 + \frac{1}{t} \sigma_2^2 + \sigma_4^2 + \sigma_{em}^2 = \frac{1}{n} \sigma_1^2 + \frac{1}{t} \sigma_2^2 + \sigma_4^2 + \left( \frac{\sigma_1^2}{kN} + \frac{\sigma_2^2}{\tau N} + \frac{\sigma_4^2}{N} + \sigma_{EH}^2 \right) = \\ &= \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{kN} \right) \sigma_1^2 + \left( 1 + \frac{1}{\tau N} \right) \sigma_2^2 + \left( 1 + \frac{1}{N} \right) \sigma_4^2 + \sigma_{EH}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\sigma_{EH}^2$  - похибка еталонного напрямку, що визначається насамперед недосконалістю методів визначення та контролю еталонного напрямку;

$\sigma_{em}^2 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{kN} + \frac{\sigma_2^2}{\tau N} + \frac{\sigma_4^2}{N} + \sigma_{EH}^2}$  - похибка еталонування;  $N$  - кількість серій вимірювань при еталонуванні при різних температурах, положеннях корпусу приладу тощо;  $k$  - кількість прийомів в кожній серії при еталонуванні,  $\tau$  - час проведення прийому при еталонуванні.

Вважаючи, що час вимірювання в одному прийомі достатній, щоб закінчилися всі перехідні теплові процеси (тобто  $\sigma_2 \approx 0$ ), а також, що еталонування виконується при незмінній температурі і положенні корпусу приладу (тобто  $N = 1$ ). Тоді з (4) отримаємо:

$$\sigma_{az}^2 = \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{k} \right) \sigma_1^2 + 2\sigma_4^2 + \sigma_{EH}^2. \quad (5)$$

При достатньо великій кількості прийомів в експлуатації та при еталонуванні, отримаємо:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ k \rightarrow \infty}} \sigma_{az}^2 = 2\sigma_4^2 + \sigma_{EH}^2.$$

Тобто, виходячи з вищенаведеного, можна зробити такі висновки:

а) багаторазові тривалі вимірювання в експлуатації та при еталонуванні можуть послабити вплив стаціонарних та нестаціонарних випадкових похибок;

б) на точність визначення азимуту, як і на точність визначення поправки значно впливають змінні систематичні похибки;

в) похибка еталонування в експлуатації сама є систематичною похибкою, тобто перешкоджає підвищенню точності визначення азимуту шляхом збільшення кількості прийомів.

г) єдиним шляхом підвищення точності визначення азимуту прецизійних гірокомпасів є компенсація систематичних похибок, що виключає необхідність визначення приладної поправки в експлуатації. Тоді в загальному вигляді похибка визначення азимуту буде характеризуватися випадковими похибками,

тобто  $\sigma_3 \approx \sigma_4 \approx 0$ , і, виходячи з (3), отримаємо:

$$\sigma_{az}^2 = \frac{1}{n} \sigma_1^2 + \frac{1}{t} \sigma_2^2, \quad (6)$$

Якщо вважати, що час вимірювання в одному прийомі достатній, щоб закінчилися всі перехідні теплові процеси, еталонування проводиться при незмінній температурі і положенні корпусу приладу, а кількість прийомів достатньо велика, то з (6) отримаємо наступну ідеалізацію:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ t \rightarrow \infty}} \sigma_{az}^2 \approx 0.$$

Компенсація моментних похибок систематичного характеру може проводитись конструктивним шляхом: зменшення люфтів, магнітне екранування тощо, та методичним: застосування відомого “методу N-S” [3].

З метою зменшення впливу геометричних похибок систематичного характеру на точність визначення азимуту проведено аналіз можливих технічних рішень, спрямованих на виключення цієї складової похибки. На рис. 1,б наведено узагальнену конструктивну схему прецизійного гірокомпаса.

Аналіз показав, що забезпечити таке положення відлікового дзеркала ЧЕ, щоб нормаль до цього дзеркала була паралельна до осі власного обертання гіромотора, та стабільність цього положення в часі можливо встановленням відлікового дзеркала ЧЕ безпосередньо на ротор гіромотора у вигляді дзеркального торця 12 [3].

Мінімізувати похибки ФАК можливо реалізуючи з'єм та передавання інформації про положення в просторі нормалі до відлікового дзеркала ЧЕ за допомогою точного ФАК, діафрагмування 10 світлового пучка ФАК, установку світлофільтрів 11, що врівноважують світлові потоки.

Неідеальність трипель-призми та інших оптичних елементів можна мінімізувати введенням у конструкцію приладу оптичних клинових компенсаторів, що дозволяють звести цю похибку до рівня  $0,3''$ .

## Висновки

Таким чином, при реалізації наведених вище методів компенсації та мінімізації похибок визначення азимуту, на можливе створення прецизійного гірокомпаса із СКП визначення азимуту  $1''$ , що характеризується переважно випадковими похибками.

Розробка прецизійних гірокомпасів є перспективним напрямком приладобудування, тому подальші дослідження похибок визначення азимуту та розробка методів їх компенсації є актуальними. Насамперед заплановано побудувати точну математичну модель похибки визначення азимуту гірокомпаса та оцінити вплив кожної її складової на точність вимірювання.

## Література

1. Воронков Н.Н., Кутырев В.В., Ашимов Н.М. Гироскопическое ориентирование. - М.: Недра, 1980. –224 с.
2. Деймлих Ф. Геодезическое инструментоведение. - М.: Недра, 1970.

3. Юр'єв Ю.Ю. Наземна маятникова автоматизована гіроскопічна насадка до теодоліту // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2003. – Вип. 25. – С. 21-25.

<p>Юр'єв Ю.Ю., Лихоткин А.М. <b>Методы компенсации погрешностей наземного маятникового прецизионного гироскопа.</b> В статье представлена обобщенная конструктивная схема прецизионного наземного маятникового гироскопа, структуру погрешности определения азимута такого прибора, а также приведены возможные пути компенсации и минимизации погрешностей определения азимута.</p>	<p>Yuryev Y.Y., Lihotkin A.M. <b>Methods of compensation of ground pendular precision gyrocompass' errors.</b> The generalized structural scheme of the precision ground pendular gyrocompass, structure of azimuth definition error, and also possible ways of compensation and minimization of azimuth definition errors are presented in the article.</p>
--	--

Надійшла до редакції  
30 серпня 2004 року

УДК 62-752.4: 528.52

## МЕТОД «СЕВЕР-ЮГ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГИРОТЕОДОЛИТА

*Лихоткин А.М., Юр'єв Ю.Ю., Казенное предприятие «Центральное конструкторское бюро  
«Арсенал», г. Киев, Украина*

*В статье рассматривается метод «Север - Юг», позволяющий уменьшить погрешность определения азимута из-за неточности калибровки системы измерения компенсационного момента прецизионного наземного гиротеодолита, реализующего компенсационный метод определения азимута*

### **Вступление**

Наземные прецизионные быстродействующие гиротеодолиты (гироскопы) применяются во многих отраслях современной техники: строительной, горной, геодезической, специального назначения и т.д., то есть в тех областях, где необходимо точное и быстрое измерение азимута, горизонтальных и вертикальных углов, когда эти измерения другими средствами невозможны или затруднены [1].

Рассматривается автоматизированный гиротеодолит, который реализует компенсационный метод определения азимута – по величине калиброванного момента, уравновешивающего направляющий момент гироскопа вблизи устойчивого и неустойчивого положений динамического равновесия чувствительного элемента (ЧЭ).

Главной особенностью конструктивной схемы рассматриваемого гиротеодолита (рис. 1) является наличие двух автономных соосных вертикальных осевых систем: оси поворота зрительной трубы 1 и оси поворота гироблока 2 с подвешенным в нем ЧЭ 3. При этом ротор 4 и статор 5 автоматического кодированного датчика угла связаны, соответственно, со зрительной трубой и пово-