

УДК 629.7.054:537.67

Ю.А. КУЗНЕЦОВ¹, А.В. ЧУМАЧЕНКО¹, С.Н. ФИРСОВ², В.Б. УСПЕНСКИЙ³,
Е.Ю. ГОЛУБ¹

¹ НПП «Хартрон-Аркас», Украина

² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

³ Национальный технический университет «ХПИ», Украина

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА РАБОТУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Рассматривается методика определения влияния магнитного поля Земли на погрешность измерений волоконно-оптического гироскопа. Предложена функция, позволяющая установить корреляционную связь между измерениями угловой скорости волоконно-оптическим гироскопом и величиной магнитной чувствительности. По результатам испытаний доказано влияние внешних магнитных полей на работу гироскопов. Приведены численные оценки составляющих погрешности, полученные в результате анализа данных испытаний волоконно-оптических гироскопов. Представлен способ уменьшения влияния внешних магнитных полей на работу исследуемых гироскопов и даны экспериментально обоснованные численные значения эффективности применения выбранного способа защиты.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, волоконно-оптический гироскоп, магнитная чувствительность, ось чувствительности гироскопа, погрешность измерения, аппроксимирующая функция, экранирование.

Введение

Магнитное поле Земли оказывает существенное влияние на работу измерительных приборов. Особенно подвержены внешним магнитным воздействиям высокочувствительные приборы, к которым относится волоконно-оптический гироскоп (ВОГ).

Принцип действия оптического гироскопа основан на эффекте Саньяка [1].

Главными составляющими погрешностей для волоконно-оптических и лазерных гироскопов являются [1]:

- дрейф нуля, вызванный изменением температуры и магнитными полями;
- стабильность коэффициента преобразования сигнала в напряжение;
- компенсируемая стабильность нуля;
- шум на выходе прибора.

Существует много веществ, оптические параметры которых зависят от величины напряженности воздействующего магнитного поля. Коэффициент преломления среды есть один из таких параметров. Изменение коэффициента преломления связано с вращением плоскости поляризации излучения, распространяющегося в среде. Вращение плоскости поляризации светового луча, распространяющегося в среде, под действием магнитного поля обусловлено эффектом Фарадея. Иногда эффектом Фарадея называют искусственную оптическую активность, возникающую в среде под действием магнитного

поля. Оптической активностью является способность вещества поворачивать вектор поляризации линейно-поляризованного светового луча. Если причиной возникновения вращательной способности является какое-либо внешнее воздействие (например, магнитное поле), то активность такого типа является искусственной.

В контуре волоконно-оптического гироскопа даже в отсутствие магнитного поля существует взаимное двулучепреломление. Кроме того, взаимодействие магнитного поля индуцирует невзаимное круговое двулучепреломление, которое зависит от направления распространения луча. Это двулучепреломление суммируется с уже существующим взаимным двулучепреломлением в волокне. Комбинация двух двулучепреломлений в контуре ВОГ и определяет его чувствительность к внешнему магнитному полю.

Однородное магнитное поле за счет эффекта Фарадея вызывает ошибку в измерении угловой скорости вращения ВОГа. Эта ошибка определяет уход прибора, который зависит от величины и ориентации магнитного поля, а также от двулучепреломления волокна в контуре. Ошибка волоконно-оптических гироскопов, связанная с магнитным полем Земли, имеет значение порядка 10 град/ч [2]. Уменьшить эту ошибку можно путем экранирования контура от магнитного поля. Кроме того, может быть также эффективным уменьшение чувствительности системы к магнитному полю путём контроля состояния поляризации волн [3].

1. Определение корреляционной связи между измерениями угловой скорости волоконно-оптическим гироскопом и величиной магнитной чувствительности

По результатам предварительных испытаний приобретённых НПП «Хартрон-Аркос» ВОГов было сделано предположение об их достаточной чувствительности к влиянию магнитного поля Земли.

С целью проверки этого предположения и получения количественных характеристик была разработана методика экспериментального исследования влияния внешнего магнитного поля на погрешность измерений величины угловой скорости волоконно-оптических гироскопов. В рамках поставленной задачи были проведены испытания, а также обработаны результаты данных испытаний блока чувствительных элементов, представляющего собой сборку из четырех волоконно-оптических гироскопов. Оси чувствительности (ОЧ) трёх ВОГов ортогональны между собой, а ОЧ четвертого ВОГа расположена под равными углами к ОЧ первых трёх.

Для количественной оценки влияния внешнего магнитного поля на работу волоконно-оптических гироскопов были проведены четыре вида испытаний:

- при воздействии на ВОГ внешнего магнитного поля (магнитное поле Земли) без применения защитного экрана;
- исследование защитных свойств экрана при отсутствии воздействия на него магнитного поля постоянного магнита;
- исследование защитных свойств экрана при воздействии на него магнитного поля постоянного магнита;
- при воздействии на ВОГ внешнего магнитного поля (магнитное поле Земли) с применением защитного экрана.

Рассмотрим более подробно предлагаемую методику определения магнитной чувствительности гироскопов и результаты её применения для проверки влияния магнитного поля на ВОГ без защитного экрана.

Блок чувствительных элементов устанавливается на наклонно-поворотное устройство так, что ось чувствительности ВОГZ направлена по местной вертикали, а оси ВОГX и ВОГY лежат в горизонтальной плоскости с начальным азимутальным углом для ВОГX $\psi_i(0) = -141,42$ град. Для анализа используются измерения проекций угловой скорости вращения Земли на горизонтальные оси X, Y блока чувствительных элементов (БЧЭ): ВОГX и ВОГY, полученные при фиксированных положениях БЧЭ. Положения БЧЭ отличаются азимутом осей

X, Y с шагом в 15 град. Схема расположения осей чувствительности X и Y относительно местной географической системы координат представлена на рис. 1.

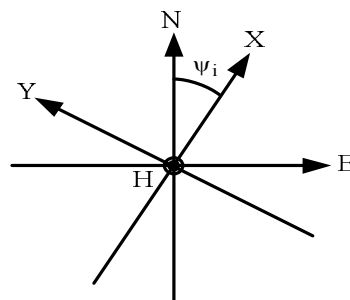


Рис. 1. Оси чувствительности X, Y гироскопов относительно местной географической системы координат с осями N, H, E:

N – направление на Север; H – местная вертикаль; E – направление на Восток

Измеряемая ВОГами величина угловой скорости представляет функцию нескольких переменных. Построение модели измерений ВОГа реализовано с учётом следующих допущений:

- плоскость, образованная осями чувствительности X и Y гироскопов остаётся горизонтальной в течение всего цикла измерений;
- погрешность реализации эталонных значений азимута в фиксированных положениях прибора, на котором установлены гироскопы, носит случайный характер и имеет неизвестное среднее $\Delta\psi_0$, связанное с неточной начальной выставкой самого прибора в азимуте;
- величина угла $\Delta\psi_0$ мала (до 5 град);
- имеет место чувствительность дрейфа как к продольной (вдоль оси чувствительности), так и перпендикулярной составляющей вектора магнитной индукции.

В соответствии с [4] усреднённые измерения по осям X и Y гироскопа можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Omega_{Xi} &= \Omega_\phi \cdot \cos(\psi_i + \Delta\psi_0) + \delta\Omega_X + \mu_{XX} \cdot (B_N \cdot \\ &\quad \cdot \cos(\psi_i + \Delta\psi_0) + B_E \cdot \sin(\psi_i + \Delta\psi_0)) + \mu_{XY} \cdot \\ &\quad \cdot (B_N \cdot \sin(\psi_i + \Delta\psi_0)) - B_E \cdot \cos(\psi_i + \Delta\psi_0)) + \\ &\quad + \mu_{XZ} \cdot B_H; \\ \Omega_{Yi} &= \Omega_\phi \cdot \sin(\psi_i + \Delta\psi_0) + \delta\Omega_Y + \mu_{YY} \cdot (B_N \cdot \\ &\quad \cdot \sin(\psi_i + \Delta\psi_0) - B_E \cdot \cos(\psi_i + \Delta\psi_0)) + \mu_{YX} \cdot \\ &\quad \cdot (B_N \cdot \cos(\psi_i + \Delta\psi_0)) + B_E \cdot \sin(\psi_i + \Delta\psi_0)) + \\ &\quad + \mu_{YZ} \cdot B_H, \end{aligned}$$

где Ω_{Xi} – усреднённое значение измерения ВОГа по оси X;

Ω_{Yi} – усреднённое значение измерения ВОГа по оси Y;

$\Omega_\varphi = \Omega_3 \cdot \cos(\varphi_0)$ – проекция угловой скорости вращения Земли $\Omega_3 = 15,04$ °/ч на северную ось в месте установки испытательного стенда с широтой $\varphi_0 = 50,05$ °СШ;

$\delta\Omega_X, \delta\Omega_Y$ – постоянный систематический дрейф осей X, Y гироскопов;

B_N, B_E, B_H – неизвестные проекции вектора магнитной индукции на северную, восточную и вертикальную оси местной географической системы координат;

$\mu_{XX}, \mu_{XY}, \mu_{XZ}$ – коэффициенты магнитной чувствительности X гироскопа к проекциям вектора магнитной индукции на собственную ось чувствительности и перпендикулярно к ней;

$\mu_{YY}, \mu_{YX}, \mu_{YZ}$ – коэффициенты магнитной чувствительности Y гироскопа к проекциям вектора магнитной индукции на собственную ось чувствительности и перпендикулярно к ней.

Синусоидальный характер ошибок измерений может быть вызван двумя факторами или их сочетанием:

- наличием магнитной чувствительности дрейфа гироскопов;

- наличием ненулевой ошибки начальной выставки блока чувствительных элементов по азимуту.

Если магнитная чувствительность дрейфа отсутствует или пренебрежимо мала, то периодические составляющие ошибки измерений ВОГХ и ВОГУ имеют одинаковую амплитуду для обоих гироскопов.

2. Экспериментальное подтверждение влияния магнитного поля Земли на работу волоконно-оптических гироскопов и применение способа защиты от внешних магнитных полей

Для подтверждения гипотезы о магнитной чувствительности данных ВОГа было решено повторить цикл испытаний, поместив блок приборов в защитный экран, изготовленный из магнитомягкого металла марки 79НМ. По опыту ряда разработчиков экранирование должно дать эффект снижения магнитной чувствительности приборов в десятки или даже в сотни раз.

На испытательном стенде при помощи микро-тесламетра постоянного тока типа Г74М были проведены замеры величин магнитного поля постоянного магнита без экрана и после помещения его в экран. Замеры выполнялись в точках 1 – 22, показанных на рис. 2 – 5. Затем был измерен фон (магнитное поле Земли). При выполнении измерений

продольная ось микро-тесламетра ориентировалась по линиям, соединяющим центр $O_{0,5L}$ с соответствующей точкой.

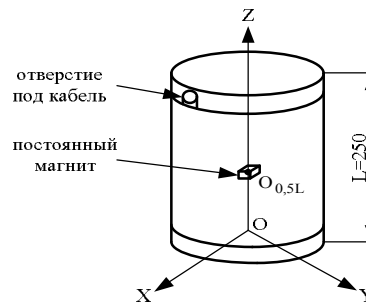


Рис. 2. Расположение постоянного магнита в защитном экране

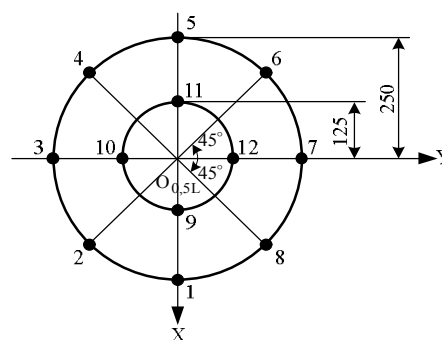


Рис. 3. Ориентация продольной оси микро-тесламетра. Вид сверху

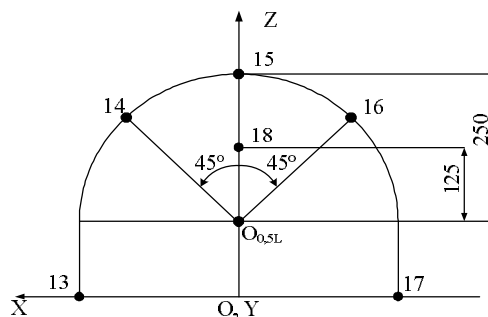


Рис. 4. Ориентация продольной оси микро-тесламетра. Вид с оси OY

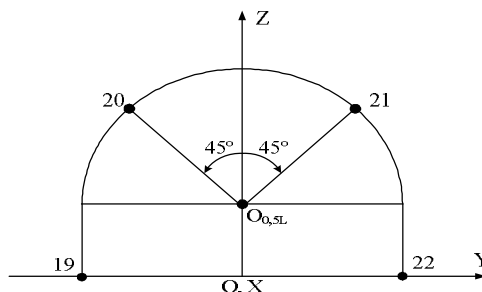


Рис. 5. Ориентация продольной оси микро-тесламетра. Вид с оси OX

Коэффициент экранирования вычисляется по формуле:

$$K_{zi} = (B - B_{\phi i_1}) / (B_i^3 - B_{\phi i_1}),$$

где B_i – величина магнитной индукции суммарного магнитного поля магнита и Земли без экранирования;

B_i^3 – величина магнитной индукции суммарного магнитного поля магнита и Земли с экранированием;

$B_{\phi i_1}$ – величина фона (магнитной индукции магнитного поля Земли);

i – номер точки замера ($i=1, 2, \dots, 22$).

Очевидно, наиболее информативны измерения в точках, в которых величина индукции магнитного поля постоянного магнита намного превосходит величину фона. Это точки №№ 3, 7, 10, 12, т. е. точки, лежащие на линии, соединяющей полюса магнита (ось OY).

На рис. 6 представлены аппроксимирующие функции $f_x(\psi)$ и $f_y(\psi)$, которые были построены в результате обработки данных для ошибок измерений ВОГХ и ВОГУ, полученных при испытаниях блока чувствительных элементов без экрана.

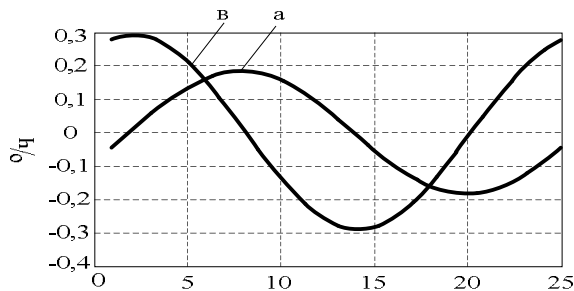


Рис. 6. Аппроксимирующие функции для измерений угловой скорости X, Y гироскопами: а – аппроксимирующая функция $f_x(\psi)$; в – аппроксимирующая функция $f_y(\psi)$

Математическое описание аппроксимирующих функций может быть представлено в виде:

$$f_x(\psi) = \delta\bar{\Omega}_x + S_x \sin(\psi + \Delta\varphi_x); \quad (1)$$

$$f_y(\psi) = \delta\bar{\Omega}_y + S_y \cos(\psi + \Delta\varphi_y), \quad (2)$$

где $\delta\bar{\Omega}$ – оценка постоянного систематического смещения нулевого сигнала ВОГГ;

S_j – амплитуда периодической составляющей ошибки измерений ВОГГ;

ψ – азимутальный угол ВОГХ;

$\Delta\varphi_j$ – фаза периодической составляющей ошибки измерений ВОГГ.

Амплитуда S_j и фаза $\Delta\varphi_j$ являются нелинейными функциями магнитной чувствительности ВОГа, ошибки начальной выставки БЧЭ по азимуту $\Delta\psi_0$ и проекции Ω_ϕ вектора угловой скорости

вращения Земли Ω_E на ось наклонно-поворотного устройства, направленную на север.

При пренебрежимо малой магнитной чувствительности ВОГа или высокой эффективности экрана формулы (1) и (2) приобретают вид:

$$f_x(\psi) = \delta\bar{\Omega}_x - \Omega_\phi \Delta\psi_0 \sin \psi; \quad (3)$$

$$f_y(\psi) = \delta\bar{\Omega}_y + \Omega_\phi \Delta\psi_0 \cos \psi, \quad (4)$$

т. е. $-S_x \rightarrow S_y \rightarrow \Omega_\phi \Delta\psi_0$.

Существенное отличие амплитуд для обоих гироскопов, полученное по экспериментальным данным, свидетельствует о значимом влиянии магнитного поля на ошибки измерений волоконно-оптических гироскопов.

Поэтому отличие амплитуд S_j периодических составляющих функций $f_x(\psi)$ и $f_y(\psi)$ примем за меру магнитной чувствительности ВОГа, а отношение (5) назовем коэффициентом эффективности экрана:

$$K_{\text{эф}} = \frac{|S_x^{\text{БЭ}}| - |S_y^{\text{БЭ}}|}{|S_x^{\text{Э}}| - |S_y^{\text{Э}}|} = \frac{\Delta S^{\text{БЭ}}}{\Delta S^{\text{Э}}}, \quad (5)$$

где $S_j^{\text{БЭ}}$ – амплитуда периодической составляющей ошибок измерений ВОГГ при испытаниях БЧЭ без экрана;

$S_j^{\text{Э}}$ – амплитуда периодической составляющей ошибок измерений ВОГГ при испытаниях БЧЭ в экране.

Ошибки измерений ВОГГ при испытаниях БЧЭ в экране определяются по формулам:

$$\Delta S^{\text{БЭ}} = |S_x^{\text{БЭ}}| - |S_y^{\text{БЭ}}|; \quad \Delta S^{\text{Э}} = |S_x^{\text{Э}}| - |S_y^{\text{Э}}|.$$

Вычисленные по результатам экспериментов №№ 3 – 8 параметры функций $f_x(\psi)$, $f_y(\psi)$ и коэффициент эффективности экрана $K_{\text{эф}}$ приведены в табл. 1.

Выделены данные одного запуска (с экраном). Видно, что оценки дрейфа в одном запуске достаточно хорошо совпадают.

Статистически обработанные данные для трёх реализаций приведены в табл. 2.

Если из выражений (1), (2) соответственно вычесть выражения (3) и (4), то при условии сильного экранирования можно получить магнитную составляющую в погрешности ВОГа. При этом, магнитная составляющая будет иметь вид периодической функции с амплитудой: для ВОГХ 0,05 град/ч и для ВОГУ 0,15 град/ч, т. е. при определенной ориентации оси чувствительности ВОГа в магнитном поле Земли вносит достаточно существенный вклад в суммарную погрешность ВОГа.

При экранировании магнитная составляющая стремится к нулю, и, как было показано выше, остаётся периодическая составляющая, зависящая от ошибки выставки БЧЭ по азимуту $\Delta\psi_0$.

Результаты исследования экрана на испытательном стенде при воздействии на него магнитного поля постоянного магнита приведены в табл. 3.

Таблица 1

Параметры аппроксимирующих функций $f_x(\psi)$, $f_y(\psi)$ и коэффициент $K_{эф}$

№ п/п	$\delta\bar{\Omega}_x$, %/ч	$\delta\bar{\Omega}_y$, %/ч	S_x , %/ч	S_y , %/ч	ΔS , %/ч	$K_{эф}$, %/ч
3	-0,080	-0,130	0,1369	-0,1361	0,0008	133,6
6	-0,054	-0,094	0,1849	-0,2918	0,1069	
4	-0,078	-0,130	0,1404	-0,1416	0,0012	82,4
7	-0,059	-0,091	0,1875	-0,2864	0,0989	
5	-0,074	-0,101	0,1462	-0,1445	0,0017	58,8
8	-0,062	-0,103	0,1916	-0,2916	0,10	

Таблица 2

Статистические характеристики параметров аппроксимирующих функций $f_x(\psi)$, $f_y(\psi)$ и усреднённый коэффициент $K_{эф}$

№ реализации	МО ($\delta\bar{\Omega}_x$), %/ч	МО ($\delta\bar{\Omega}_y$), %/ч	СКО ($\delta\bar{\Omega}_x$), %/ч	СКО ($\delta\bar{\Omega}_y$), %/ч	$K_{эф}$
3+4+5	-0,0773	-0,1203	0,0022	0,0129	91,6
6+7+8	-0,0583	-0,0960	0,0029	0,0047	

Таблица 3

Результаты исследования экрана на испытательном стенде при воздействии на него магнитного поля постоянного магнита

№ п/п точки i	Показания микротесламетра, мкТл		
	B_i	B_i^{\ominus}	$B_{\Phi i}$
3	-110	-13	-6
7	100	11	8
10	-580	-19	-6
11	-30	-7	-2
12	680	20	8
15	26	17	13
16	86	6	8
18	90	23	13

Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования с помощью разработанной методики установлено наличие существенной зависимости измерений волоконно-оптических гироскопов от внешнего магнитного поля.

Количественная оценка такого влияния возможна только после определения погрешности начальной выставки гироскопов. При правильной выставке диапазон изменения дрейфа ВОГа вследствие влияния магнитного поля Земли достигает $\pm 0,3$ %/ч.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие рекомендации по использованию волоконно-оптических гироскопов в

условиях наземной калибровки и эксплуатации на орбите:

- при калибровке гироскопов следует учитывать влияние магнитного поля на ошибки измерений;
- для эффективной эксплуатации ВОГа необходимо либо определить коэффициенты чувствительности для каждой оси и далее компенсировать влияние поля алгоритмически (требует текущих измерений фактического магнитного поля и ведет к усложнению системы ориентации), либо обеспечить экранирование ВОГа от внешнего поля.

При необходимости повышения точности оценки магнитной чувствительности ВОГа следует разработать методику, основанную на искусственном создании постоянного и переменного магнитных полей, воздействующих на прибор, а также создать специальный испытательный стенд для проведения таких испытаний.

Литература

1. Карпенко, С.О. Средства определения ориентации на борту малого КА. Обзор [Электронный ресурс] / С.О. Карпенко. – Режим доступа: http://microsat.sm.bmstu.ru/source/ma_A_170401_V11.pdf. – 27.02.2012 г.
2. Анализ погрешностей волоконно-оптического гироскопа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radioland.net.ua/contentid-17-page1.html>. – 27.02.2012 г.
3. Теория моделей в процессах управления [Текст] / Б.Н. Петров, Г.М. Уланов, И.И. Гольденблат, С.В. Ульянов. – М.: Наука, 1978. – 224 с.

4. Буравлѣв, А.С. Волоконно-оптические гироскопы в условиях постоянного магнитного поля [Текст] / А.С. Буравлѣв, Д.А. Егоров, Л.Г. Лисицин // Гироскопия и навигация. – 2008. – Вып. 3. – С. 592 – 598.

5. Результаты исследования влияния магнитного поля Земли на погрешность измерений воло-

конно-оптического гироскопа [Текст] / Ю.М. Златкин, С.В. Олейник, Ю.А. Кузнецов, В.Б. Успенский, И.А. Багмут // Космическая техника. Ракетное вооружение: Збірник наукових праць Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» імені М. К. Янгеля». – Вып. 20. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 11 – 17.

Поступила в редакцию 26.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ НА РОБОТУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ГІРОСКОПІВ

Ю.О. Кузнецов, О.В. Чумаченко, С.М. Фірсов, В.Б. Успенський, К.Ю. Голуб

Розглядається методика визначення впливу магнітного поля Землі на похибку вимірювань волоконно-оптичного гіроскопа. Запропонована функція, що дозволяє встановити кореляційний зв'язок між вимірами кутової швидкості волоконно-оптичним гіроскопом і величиною магнітної чутливості. За результатами випробувань доведено вплив зовнішніх магнітних полів на роботу гіроскопів. Наведено чисельні оцінки складових похибки, отриманні в результаті аналізу даних випробувань волоконно-оптичних гіроскопів. Представлений спосіб зменшення впливу зовнішніх магнітних полів на роботу досліджуваних гіроскопів і дані експериментально обґрунтовані чисельні значення ефективності застосування обраного способу захисту.

Ключові слова: магнітне поле Землі, волоконно-оптичний гіроскоп, магнітна чутливість, вісь чутливості гіроскопа, похибка вимірювання, апроксимуюча функція, екранування.

THE METHODOLOGY OF DETERMINING AND TEST RESULTS OF THE EARTH MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON THE FIBER-OPTIC GYROSCOPES OPERATION

Yu.A. Kuznetsov, A.V. Chumachenko, S.N. Firsov, V.B. Uspensky, Ye.Yu. Golub

Considered the methodology of determining of the Earth magnetic field influence on the fiber-optic gyroscope measurement error. Propose a feature that allows you to ascertain correlation between the angular velocity measurements of the fiber-optic gyroscope and the magnetic sensitivity value. According to the tests proved the influence of external magnetic fields on the gyroscopes operation. Given numerical evaluation of components of the error resulting from the analysis of test data for fiber-optic gyroscopes. Presented the method to reduce the influence of external magnetic fields on the operation of investigated gyroscopes and are experimentally based numerical values of the effectiveness of the chosen method of protection.

Key words: Earth magnetic field, the fiber-optic gyroscope, magnetic sensitivity, sensitive axis of the gyroscope, accuracy of the measurement, approximating function, screening.

Кузнецов Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, начальник сектора, НПП «Хартрон-Аркос», Харьков, Украина

Чумаченко Алексей Валентинович – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела 13060, НПП «Хартрон-Аркос», Харьков, Украина.

Фирсов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры систем управления летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Успенский Валерий Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем и процессов управления, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

Голуб Екатерина Юрьевна – магистрант кафедры метрологии и информационно-измерительных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.