

ДО ОБГОВОРЕННЯ

УДК 621.7.054.847

Кузнецов Ю.А., канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРИЕНТАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Введение. В современных системах управления динамических объектов механические (поплавковые) гироскопические измерители угловой скорости вытесняются приборами, функционирование которых основано на других физических принципах. Широкое распространение в системах управления получают бесплатформенные инерциальные блоки, построенные на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) [1, 2, 3].

Основными факторами, влияющими на погрешность измерений ВОГ, как известно, являются температура, магнитное поле и радиация [4]. Исследованию влиянию указанных факторов и способам борьбы с ними посвящено достаточно много публикаций [5, 6, 7, 8]. Особое место занимает вопрос влияния на погрешность измерений ВОГ внешнего магнитного поля. Магнитная чувствительность ВОГ является следствием проявления эффекта Фарадея, заключающегося в изменении плоскости поляризации света, движущегося в оптоволоконном контуре ВОГ, при действии на прибор внешнего магнитного поля [4].

По результатам магнитных испытаний ВОГ типа ОИУС501 (разработчик ООО НПК «Оптолинк», г. Зеленоград, Россия) в научно-производственном предприятии «Хартрон-Аркос» величина составляющей ошибки измерений, вызванной влиянием внешнего магнитного поля, достаточно существенна и может составлять $0,05 \dots 0,3^\circ/\text{ч}$ [7]. Однако вопрос влияния на погрешность измерения ВОГ его ориентации во внешнем магнитном поле, в частности, магнитном поле Земли (МПЗ) недостаточно изучен.

Постановка задачи. В статье [7] представлены результаты магнитных испытаний ВОГ ОИУС501 по оригинальной методике, заключающейся во вращении на наклонно-поворотном устройстве (НПУ) в плоскости местного горизонта блока чувствительных элементов (БЧЭ) бесплатформенного инерциального блока, построенного на базе ВОГ, и определении погрешности измерений ВОГХ и ВОГУ при различном значении азимутального угла ψ БЧЭ. Угол ψ отсчитывается от направления на Север до оси чувствительности ВОГХ.

На рис. 1 изображена схема магнитных испытаний БЧЭ. На рис. 1 показаны:

$O_i X_i Y_i Z_i$ – вторая экваториальная (инерциальная) система координат;

$O X_o Y_o Z_o$ – местная орбитальная система координат;

$O X_{II} Y_{II} Z_{II}$ – приборная система координат (ПСК), связанная с БЧЭ;

λ, φ – долгота и широта места испытаний;

ψ – азимутальный угол БЧЭ;

N – направление на северный полюс Земли;

Ω_m, φ_m – углы, определяющие положение вектора магнитного момента диполя Земли \mathbf{D} во второй экваториальной системе координат;

\mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля Земли.

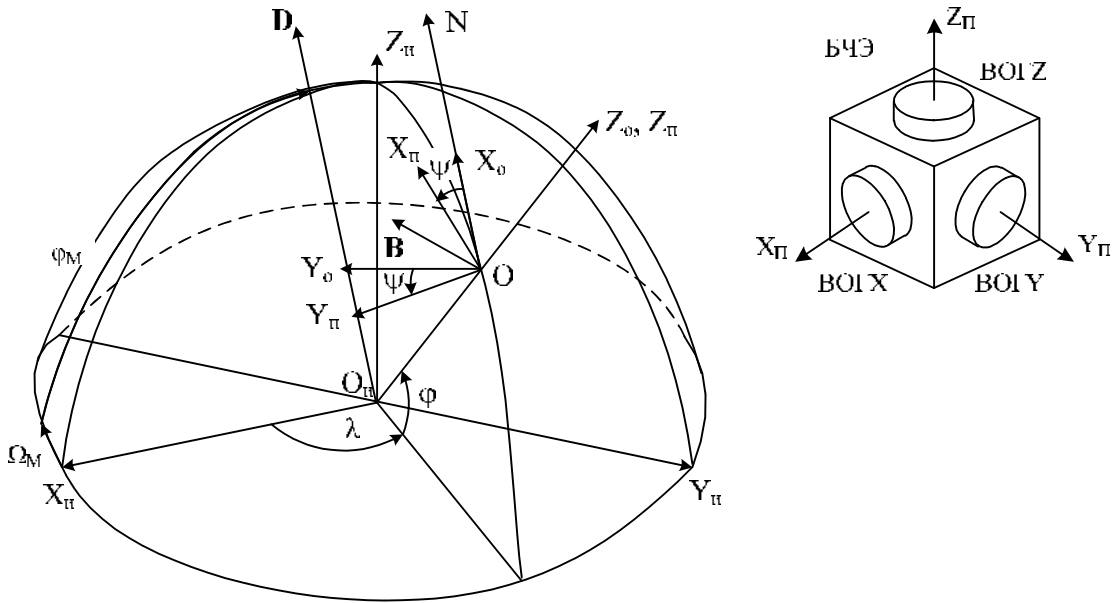


Рис.1. Схема магнитных испытаний БЧЭ

Рассмотрим, как меняется магнитная чувствительность ВОГ в зависимости от взаимной ориентации вектора индукции МПЗ \mathbf{B} и оси чувствительности или плоскости волоконного контура ВОГ.

В соответствии с результатами магнитных испытаний [7] ошибки измерений ВОГХ и ВОГУ БЧЭ описываются функциями вида:

$$f_x(\psi) = \delta\Omega_x + S_x \sin(\psi + \Delta\varphi_x); \quad (1)$$

$$f_y(\psi) = \delta\Omega_y + S_y \cos(\psi + \Delta\varphi_y), \quad (2)$$

где $\delta\Omega_j$, S_j , $\Delta\varphi_j$ ($j=x, y$) – оценка постоянного систематического смещения нулевого сигнала, амплитуда и фазовый сдвиг периодической составляющей ошибки измерений ВОГJ ($J=X, Y$); ψ – азимутальный угол БЧЭ.

В результате испытаний получены численные значения параметров функций (1) и (2):

– при испытаниях ВОГ без экрана $\delta\Omega_x = -0,0583^\circ/\text{ч}$; $S_x = 0,1880^\circ/\text{ч}$;

$\delta\Omega_y = -0,0960^\circ/\text{ч}$; $S_y = -0,2899^\circ/\text{ч}$;

– при испытаниях ВОГ с экраном $\delta\Omega_x = -0,0773^\circ/\text{ч}$; $S_x = 0,1412^\circ/\text{ч}$;

$\delta\Omega_y = -0,1203^\circ/\text{ч}$; $S_y = -0,1407^\circ/\text{ч}$.

Фазовый сдвиг $\Delta\varphi_j$ ($j=x, y$) составляет величину около -15° для двух видов испытаний.

Тогда аппроксимирующие функции, описывающие магнитную составляющую для ВОГХ и ВОГУ, получим в виде:

$$\Delta f_x(\psi) = \Delta\Omega_x + \Delta S_x \sin(\psi + \Delta\varphi_x); \quad (3)$$

$$\Delta f_y(\psi) = \Delta\Omega_y + \Delta S_y \cos(\psi + \Delta\varphi_y), \quad (4)$$

где $\Delta f_j(\psi)$, $\Delta\Omega_j$, ΔS_j ($j=x, y$) – разности между функциями и соответствующими составляющими, полученными при испытаниях ВОГ без экрана и в экране.

Численные значения параметров функций (3) и (4) равны:

$\Delta\Omega_x = 0,0190^\circ/\text{ч}$; $\Delta S_x = 0,0468^\circ/\text{ч}$; $\Delta\Omega_y = 0,0243^\circ/\text{ч}$; $\Delta S_y = -0,1492^\circ/\text{ч}$.

Определим, при какой взаимной ориентации осей чувствительности ВОГХ и ВОГУ относительно вектора индукции магнитного поля Земли \mathbf{B} функции (3), (4) имеют максимум и минимум.

Решение поставленной задачи. Проекции вектора $\mathbf{B}_0 = \{B_{0j}\}$ ($j=x, y, z$) в точке испытаний на оси местной ОСК вычислим по формулам математической модели магнитного поля Земли, моделируемого как «наклонный диполь» [9]

$$\begin{aligned} B_{0X} &= B_0 \sin \xi_m \sin(u - \eta_m), \\ B_{0Y} &= B_0 \cos \xi_m, \\ B_{0Z} &= -2B_0 \sin \xi_m \cos(u - \eta_m), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \sin \xi_m &= \sqrt{1 - (\sin \varphi_m \cos i + \cos \varphi_m \sin i \sin \Omega_\Sigma)^2}, \\ \eta_m &= \arctg \frac{\sin \varphi_m \sin i - \cos \varphi_m \cos i \sin \Omega_\Sigma}{\cos \varphi_m \cos \Omega_m}. \end{aligned}$$

Здесь B_0 – значение модуля вектора \mathbf{B}_0 на магнитном экваторе; u – аргумент широты; i – наклонение орбиты; φ_m, Ω_m – углы, определяющие во второй экваториальной системе координат положение вектора магнитного момента диполя Земли;

$\Omega_\Sigma = \Omega_m + \Omega - (\omega_E + \frac{d\Omega}{dt})t$; Ω – долгота восходящего узла орбиты; ω_E – угловая

скорость вращения Земли; $\frac{d\Omega}{dt}$ – угловая скорость прецессии орбиты; ξ_m – наклонение плоскости орбиты к магнитному экватору; η_m – угол между восходящими узлами в плоскостях географического и магнитного экваторов.

Как известно, южный полюс МПЗ смещен относительно географического северного полюса Земли на $11,5^\circ$ и имеет координаты $78,5^\circ$ с.ш. и $69,1^\circ$ з.д. Широта φ и долгота λ места проведения испытаний в г. Харькове соответственно равны $50^\circ 03'$ и $36^\circ 17'$. Наклонение i в данном случае принимаем равным 90° .

Учитывая, что МПЗ вращается вместе с Землей, рассчитаем проекции вектора \mathbf{B}_0 для времени 00 ч 00 мин 00 с. Тогда параметр Ω_Σ будет равен $\Omega_m + \Omega$ или $\Omega_m + \lambda$, где $\lambda = \Omega$ – долгота места испытаний.

Для следующих численных значений исходных данных:

$$B_0 = 31 \cdot 10^3 \text{ нТл}; \varphi_m = 78,5^\circ; \Omega_m = 69,1^\circ; \lambda = 36^\circ 17'; u = \varphi = 50^\circ 03'; i = 90^\circ$$

получим

$$B_{0X} = 21846,0 \text{ нТл}; B_{0Y} = 5967,0 \text{ нТл}; B_{0Z} = -42340,0 \text{ нТл}.$$

В приборной системе координат (ПСК) БЧЭ проекции вектора \mathbf{B}_0 будут равны

$$\mathbf{B}_\Pi = \begin{bmatrix} B_{\Pi X} \\ B_{\Pi Y} \\ B_{\Pi Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{0X} \\ B_{0Y} \\ B_{0Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{0X} \cos \psi + B_{0Y} \sin \psi \\ -B_{0X} \sin \psi + B_{0Y} \cos \psi \\ B_{0Z} \end{bmatrix}.$$

Взаимное угловое положение ВОГJ, а именно оси чувствительности \mathbf{OVJ} ($J=X, Y$), относительно вектора $\mathbf{B}_\Pi = \{B_{\Pi j}\}$ ($j=x, y, z$) оценим по формуле

До обговорення

$$\cos \alpha_j = (\mathbf{B}_\Pi, \mathbf{OVJ}) = \sum_j B_{\Pi j} OVJ_j \quad (j=x, y).$$

С учетом установки ВОГJ в ПСК БЧЭ, при которой $\mathbf{OVX} = (1, 0, 0)^T$, $\mathbf{OVY} = (0, 1, 0)^T$, получим

$$\cos \alpha_j = \frac{B_{\Pi j}}{|\mathbf{B}_\Pi|}, \quad (j=x, y)$$

т.е.

$$\cos \alpha_X = \frac{B_{0X} \cos \psi + B_{0Y} \sin \psi}{B_0}; \quad (5)$$

$$\cos \alpha_Y = \frac{-B_{0X} \sin \psi + B_{0Y} \cos \psi}{B_0}, \quad (6)$$

где

$$B_0 = |\mathbf{B}_0| = \sqrt{\sum_{j=x,y,z} B_{0j}^2}.$$

Из условия экстремума функций (3), (4)

$$\frac{\partial[\Delta f_x(\psi)]}{\partial \psi} = \Delta S_x \cos(\psi + \Delta \varphi_x) = 0;$$

$$\frac{\partial[\Delta f_y(\psi)]}{\partial \psi} = -\Delta S_y \sin(\psi + \Delta \varphi_y) = 0$$

следует, что $\max|\Delta f_x(\psi)|$ имеет место в окрестности значений углов $\psi = \pi/2 - \Delta \varphi_x$, $3\pi/2 - \Delta \varphi_x$, а $\max|\Delta f_y(\psi)| - \psi = 0 - \Delta \varphi_y$, $\pi - \Delta \varphi_y$, $2\pi - \Delta \varphi_y$.

Как было сказано выше, по результатам испытаний фазовый угол $\Delta \varphi_j$ ($j=x, y$) равен $\sim -15^\circ$. Тогда по формулам (5), (6) получим, что максимальная чувствительность ВОГX и ВОГY проявляется в окрестности значений углов $\alpha_{x,y} = 90 \pm 3^\circ$.

Поставим обратную задачу: каким должен быть фазовый сдвиг азимутального угла в магнитной составляющей ошибки измерений ВОГ для того, чтобы в точках максимальной чувствительности ВОГ выполнялось условие $\alpha_j = 90^\circ$, т.е. $\cos \alpha_j = 0$ ($j=x, y$).

При выполнении данного условия из выражений (5), (6) получим уравнения

$$\begin{aligned} B_{0X} \cos \psi + B_{0Y} \sin \psi \Big|_{\psi = \frac{\pi}{2} - \Delta \varphi_x} &= B_{0X} \sin \Delta \varphi_x + B_{0Y} \cos \Delta \varphi_x = 0; \\ -B_{0X} \sin \psi + B_{0Y} \cos \psi \Big|_{\psi = -\Delta \varphi_y} &= B_{0X} \sin \Delta \varphi_y + B_{0Y} \cos \Delta \varphi_y = 0. \end{aligned}$$

Откуда следует, что

$$\Delta \varphi_{x,y} = -\operatorname{arctg} \frac{B_{0Y}}{B_{0X}},$$

и для значений проекций B_{0X} , B_{0Y} в месте проведения испытаний фазовый угол $\Delta \varphi_j$ должен равняться $-15,3^\circ$, что с достаточной точностью совпадает со значением этого угла, полученным по экспериментальным данным.

Анализ результатов. Следовательно, можно сделать вывод о том, что максимальная чувствительность ВОГ имеет место при действии вектора индукции внешнего магнитного поля ортогонально оси чувствительности ВОГ, т.е. в плоскости волоконного контура.

При этом отметим, что знак магнитной составляющей ошибки ВОГ зависит от направления действия вектора индукции внешнего магнитного поля. Так, например, для ВОГХ при $\psi = \pi/2 - \Delta\varphi_x$ магнитная ошибка максимальна и положительна, а при $\psi = 3\pi/2 - \Delta\varphi_x$ – отрицательна.

На рис. 2 и 3 показаны графики изменения функций $\Delta f_j(\psi)$ и углов $\alpha_j(\psi)$ ($j=x, y$), которые наглядно демонстрируют сказанное выше.

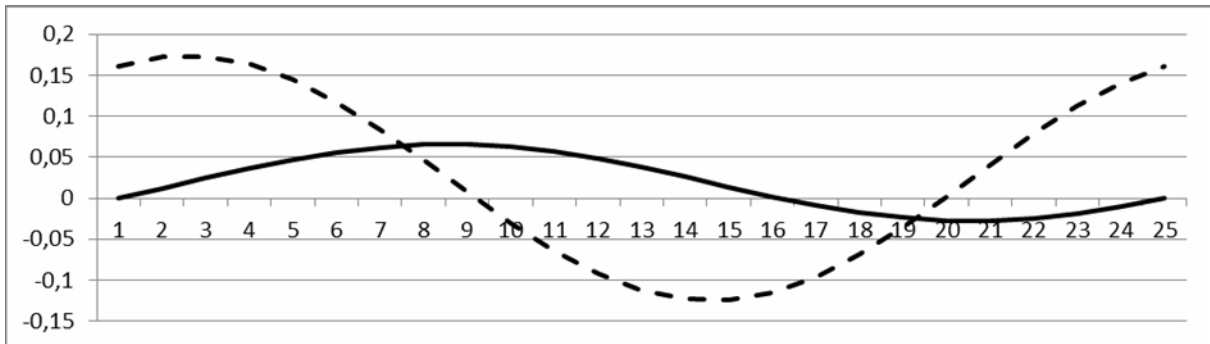


Рис. 2. Функции $\Delta f_j(\psi)$: сплошная – $\Delta f_x(\psi)$, град/ч; пунктирная – $\Delta f_y(\psi)$, град/ч

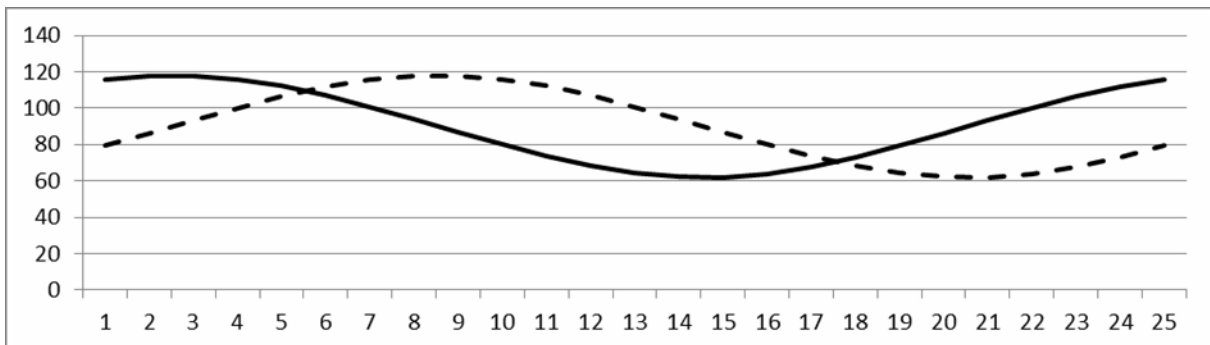


Рис. 3. Углы $\alpha_j(\psi)$: сплошная – $\alpha_x(\psi)$, град; пунктирная – $\alpha_y(\psi)$, град

По оси абсцисс азимутальный угол ψ отложен номерами точек, в которых производились измерения ВОГ при магнитных испытаниях: в точке 1 $\psi = -141,5^\circ$, в точке 2 $\psi = -156,5^\circ$ и т.д. до полного оборота БЧЭ на угол 360° .

Объяснение зависимости магнитной чувствительности ВОГ от его ориентации, возможно, состоит в следующем.

При действии вектора индукции внешнего магнитного поля вдоль оси чувствительности ВОГ изменение плоскости поляризации лучей света (эффект Фарадея [4]) прямого и обратного хода происходит в равной степени. При действии вектора индукции внешнего магнитного поля в плоскости волоконного контура изменение плоскости поляризации лучей света в дальних витках волокна происходит слабее, чем в ближних витках, что и вызывает дополнительное фазовое смещение при сложении света в фотоприемнике и соответственно порождает дополнительное смещение нулевого сигнала ВОГ.

Выводы. По результатам испытаний ВОГ типа ОИУС501 определена зависимость величины влияния внешнего магнитного поля от ориентации ВОГ в этом поле. Максимальное влияние имеет место при действии вектора индукции внешнего магнитного поля ортогонально оси чувствительности ВОГ, т.е. в плоскости волоконного контура. Причем знак магнитной составляющей ошибки ВОГ зависит от направления действия вектора индукции внешнего магнитного поля.

При проведении наземных испытаний ВОГ необходимо учитывать влияние МПЗ путем выбора соответствующей ориентации прибора. Если это сложно сделать при испытаниях ВОГ в составе БЧЭ бесплатформенного инерциального блока, например, при проведении наземной калибровки, приборы должны быть надежно экранированы или помещены в устройство, компенсирующее влияние МПЗ.

Литература: 1. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – № 1 (72). 2011. – С. 3-16. 2. Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б. Трехосный волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем // Сб. трудов XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – С. 7-12. 3. Златкин Ю.М., Олейник С.В., Кузнецов Ю.А., Успенский В.Б., Багмут И.А. Технология и результаты испытаний бесплатформенного астроинерциального блока для систем управления космических аппаратов // Сб. трудов XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С. 211-214. 4. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп / А. Г. Шереметьев. – М.: Радио и связь, – 1987. – 152 с. 5. Кузнецов Ю.А., Олейник С.В., Успенский В.Б., Хацько Н.Е. Разработка модели дрейфа ВОГ ОИУС501 в условиях температурных изменений датчика // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. – Т. 6. – Секция 10 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; – Харьков: Национ. техн. ун-т «ХПИ», 2012. – С. 82-84. 6. Буравлев А.С., Егоров Д.А., Лисин Л.Г. Волоконно-оптические гироскопы в условиях постоянного магнитного поля // Гироскопия и навигация. – № 3 (62). 2008. – С. 59-63. 7. Златкин Ю.М., Олейник С.В., Кузнецов Ю.А., Успенский В.Б. Результаты исследования влияния магнитного поля Земли на погрешность измерений волоконно-оптического гироскопа // Научно-техн. сб. «Космическая техника. Ракетное вооружение», посвященный 100-летию со дня рождения академика М.К. Янгеля. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2011. – С. 6-11. 8. Чумаченко А.В., Фирсов С.Н., Кузнецов Ю.А., Успенский В.Б., Голуб Е.Ю. Методика определения и результаты испытаний влияния магнитного поля Земли на работу волоконно-оптических гироскопов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2012. – № 2 (54). – С. 66-71. 9. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1974. – 34 с.

Bibliography (transliterated): 1. Peshehonov V.G. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya girokopicheskikh sistem // Girokopija i navigacija. – № 1 (72). 2011. – S. 3-16. 2. Meshkovskij I.K., Strigalev V.E., Dejneka G.B. Trehosnyj volokonno-opticheskij girokop dlja morskikh navigacionnyh sistem // Sb. trudov XVI Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii po integrirovannym navigacionnym sistemam. GNC RF CNII «Jelektropribor», 2009. – S. 7-12. 3. Zlatkin Ju.M., Olejnik S.V., Kuznecov Ju.A., Uspenskij V.B., Bagmut I.A. Tehnologija i rezul'taty ispytanij besplatformennogo astroinercial'nogo bloka dlja sistem upravlenija kosmicheskikh apparatov // Sb. trudov XIX Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii po integrirovannym navigacionnym sistemam. GNC RF CNII «Jelektropribor», 2012. – S. 211-214. 4. Sheremet'ev A. G. Volokonnyj opticheskij girokop / A. G. Sheremet'ev. – M.: Ra-dio i svjaz', – 1987. – 152 s. 5. Kuznecov Ju.A., Olejnik S.V., Uspenskij V.B., Hac'ko N.E. Razra-botka modeli drejfa VOG OIUS501 v uslovijah temperaturnyh izmenenij datchika // Mate-maticheskie metody v tehnikе i tehnologijah – MMTT-25: sb. trudov XXV Mezhdunar. nauch. konf.: v 10 t. – T. 6. – Sekcija 10 / pod obshh. red. A.A. Bol'shakova. – Volgograd: Volgogr. gos. tehn. un-t, 2012; – Har'kov: Nacion. tehn. un-t «HPI», 2012. – S. 82-84. 6. Buravlev A.S., Egorov D.A., Lisin L.G. Volokonno-opticheskie girokopy v uslovijah postojannogo magnitnogo polja // Girokopija i navigacija. – № 3 (62). 2008. – S. 59-63. 7. Zlatkin Ju.M., Olejnik S.V., Kuznecov Ju.A., Uspenskij V.B. Rezul'taty issledovanija vlijanija magnitnogo polja Zemli na pogreshnost' izmerenij volokonno-opticheskogo girokopa // Nauchno-tehn. sb. «Kosmicheskaja

tehnika. Raketnoe vooruzhenie», posvjashhennyj 100-letiju so dnja rozhdenija akademika M.K. Jangelja. – Dnepropetrovsk: GP «KB «Juzhnoe», 2011. – S. 6-11. 8. Chumachenko A.V., Firsov S.N., Kuznecov Ju.A., Uspenskij V.B., Golub E.Ju. Metodika opredelenija i rezul'taty ispytanij vlijanija magnitnogo polja Zemli na rabotu volokonno-opticheskikh giroskopov // Radio-elektronni i komp'juterni sistemi. 2012. – № 2 (54). – S. 66-71. 9. Alekseev K.B., Bebenin G.G. Upravlenie kosmicheskimi letatel'nymi apparatami. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 34 s.

Кузнецов Ю.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА ЗАЛЕЖНО ВІД ОРІЄНТАЦІЇ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ ЗЕМЛІ

У статті представлені результати аналізу магнітної чутливості волоконно-оптичного гіроскопа залежно від його орієнтації в зовнішньому магнітному полі, зокрема, в магнітному полі Землі. Дані відповідні рекомендації з проведення наземних випробувань і калібрувань безплатформених інерціальних блоків, що створюються на базі волоконно-оптичних гіроскопів.

Кузнецов Ю.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОРИЕНТАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

В статье представлены результаты анализа магнитной чувствительности волоконно-оптического гироскопа в зависимости от его ориентации во внешнем магнитном поле, в частности, в магнитном поле Земли. Даны соответствующие рекомендации по проведению наземных испытаний и калибровки бесплатформенных инерциальных блоков, создаваемых на базе волоконно-оптических гироскопов.

Kuznyetsov Y.A.

RESEARCH OF THE MAGNETIC SENSITIVITY OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE DEPENDING ON THE ORIENTATION OF THE MAGNETIC FIELD OF THE EARTH

The results of the analysis of the magnetic sensitivity of fiber-optic gyroscope, depending on the orientation of the external magnetic field, in particular, in the magnetic field of the Earth are presented. The appropriate recommendations for ground testing and calibration of Strapdown Inertial blocks, created on the basis of fiber-optic gyroscopes, are given.

УДК004.932.2

Таранов Д.В.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ПРОЕКТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЧЕРТЕЖЕЙ

Проблема оценки качества цифровых изображений является одной из основных проблем в области цифровой обработки и распознавания изображений. Особенно остро этот вопрос стоит в случае отсутствия эталонных изображений. Например, в системах микрофильмирования технической документации исходные изображения получают из различных источников в электронном виде. Перед микрофильмированием требуется оценка пригодности цифровых изображений к микрофильмированию. На данный момент такая оценка выполняется в "ручном" режиме, т.е. все показатели качества изображения получают с помощью линейки и калькулятора, что требует значительных временных затрат на подготовку технической документации к микрофильмированию.