

УДК 629.7.054

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРЕХОСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА УСТРАНЕНИЕМ БОКОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА

О. Я. Ковалец

Ассистент

Кафедры биотехники и инженерии
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056
Контактный тел.: (044) 454-94-51
E-mail: karachun1@gala.net

Здійснюється аналіз можливості зменшення дрейфу тривісної гіростабілізованої платформи шляхом використання в кожному каналі стабілізації замість одного – двох поплавцевих гіроскопів, які з'єднані електромеханічно. Доведена ефективність метода двохканальності за кутового руху фюзеляжа

Ключові слова: гіростабілізована платформа, двохканальна автокомпенсація, поплавцевий гіроскоп

Проводится анализ возможности уменьшения дрейфа трехосной гиростабилизированной платформы использованием по каждому каналу стабилизации вместо одного – двух поплавковых гироскопов, соединенных электромеханически. Доказана эффективность метода двухканальности при угловом движении фюзеляжа

Ключевые слова: гиростабилизированная платформа, двухканальная автокомпенсация, поплавковый гироскоп

The analysis of possibility of diminishing of drift of triaxial gyrostabilized platform using on every channel of stabilizing in place of one – two float gyroscopes, united electromechanics, is conducted. Efficiency of method of double channel at angular motion of fuselage is well-proven

Keywords: gyrostabilized platform, double channel autoindemnification, float gyroscope

1. Введение

Исследования относятся к области прикладной гироскопии и посвящены анализу уменьшения величины дрейфа трехосной гиростабилизированной платформы использованием по каждому каналу схем со структурной избыточностью на основе прямого применения принципа двухканальности Б.Н. Петрова. В предлагаемом аспекте изучения явления, исследования не проводились.

Сосредотачивается внимание на главном факторе ухудшения параметров ГСП – наличии боковой чувствительности гироскопов по каждому каналу стабилизации. Особо выделено явление присутствия постоянной составляющей сигнала чувствительных элементов при детерминированном характере угловых колебаний корпуса летательного аппарата.

2. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследований

Гиростабилизированные платформы нашли широкое применение на подвижных объектах различного

класса. Это ракеты-носители, спутники, тактическая палубная авиация, стратегическая бомбардировочная авиация, надводные и подводные корабли, боевые машины, палубная артиллерия и многие другие, в том числе, средства обороны. Основная задача, решаемая ГСП, состоит в построении на подвижном объекте, в общем случае, триортогональной системы координат заданной привязки и требуемой точности. Особенно важны эти характеристики для устанавливаемых на них оптико-электронных приборов, гироскопов, гиротеодолитов, приборов ночного видения, оптических головок инфракрасного самонаведения и многих других.

Вместе с тем, в работах Б.И. Назарова и других авторов с очевидностью доказано, что трехосная стабилизированная платформа все же подвержена действию внешних, гармонических или случайных, возмущений, приводящих к собственным уходам относительно всех трех осей, что порождено, главным образом, наличием перекрестных связей между каналами стабилизации [1]. Наиболее существенное влияние на величину дрейфа платформы оказывают перекрестные связи по гироскопическим моментам ($-H_1\sigma_y$, $-H_2\tau_x$, $-H_3\chi_y$), возникающие при отклонении гироскопов относительно осей их

подвеса. Ограничимся, поэтому, изучением вопроса повышения точности ГСП именно в этом аспекте – уменьшением влияния перекрестных связей.

Как известно, влияние перекрестной угловой скорости может быть в известной мере устранено использованием двухроторных приборов, либо гироскопов с принудительным возвратом на нуль, а также применением электрической пружины [2]. Недостатки этих методов достаточно подробно проанализированы в литературе.

Оценим возможности методов автокомпенсации для повышения точности ГСП. Очевидно, что использование метода *принудительного вращения опор* карданова подвеса гироскопа, строго говоря, нецелесообразно, т.к. исключает возможность использования поплавковых приборов. Метод *принудительного вращения двухстепенных гироскопов* также непригоден из-за возникновения в этом случае гироскопических моментов, приводящих к дополнительным погрешностям приборов. К тому же, компенсация этих моментов усложняет практическое применение метода [3]. Основным же недостатком метода *реверсирования вектора кинетического момента* является компенсация уходов гироскопов лишь в среднем за период реверса.

Возможность повышения точности построения стабилизированной в пространстве площадки оценим путем уменьшения погрешностей ее гироскопических чувствительных элементов. Средством достижения поставленной цели выберем метод двухканальности [4, 5]. Кроме несомненных достоинств, этот метод, к сожалению, не лишен и недостатков, которые проявляются, с одной стороны, в виде двукратного увеличения габаритов и веса, с другой – всего лишь в осреднении проявления внутренних помех гироскопов. Второй недостаток, между тем, легко устраняется известными конструкторско-технологическими методами, например, использованием поплавкового подвеса и точной балансировкой гиروزла.

3. Уравнения движения ГСП и приближенные решения. Гироскопы с дифференциальным выходом

Известно [1], что гироскопические стабилизаторы, построенные на базе поплавковых интегрирующих гироскопов, имеют уходы, значительно превышающие собственный уход таких гироскопов в условиях неподвижного основания. Такое увеличение объясняется, в первую очередь, влиянием на них угловых колебаний стабилизированной платформы. Как было установлено Б.И. Назаровым [6] и С.С. Арутюновым [7], особенно значительными уходы интегрирующих гироскопов становятся в случае угловых колебаний основания вокруг двух или трех его осей с близкими или одинаковыми частотами.

Проанализируем схемную возможность уменьшения влияния угловых колебаний стабилизированной платформы на величину собственного ухода интегрирующего гироскопа и, следовательно, стабилизатора.

Детерминированные возмущения. Кинематическая схема трехосной гиростабилизированной платформы с использованием двух гироскопов в каждом канале стабилизации приведена на рис. 1.

В соответствии с этой схемой, линеаризованные уравнения движения платформы имеют вид [1, 8]:

$$\begin{aligned}
 & A\dot{\omega}_x + f_x \omega_x - H_{11}\dot{\sigma}_1 + H_{12}\dot{\sigma}_2 - k_1 F_1(\sigma_1 - \sigma_2) = M_x; \\
 & C'_{11}\dot{\sigma}_1 + f_{11}\dot{\sigma}_1 + H_{11}\omega_x = M_{z11} - H_{11}\sigma_1 \omega_y; \\
 & C'_{12}\dot{\sigma}_2 + f_{12}\dot{\sigma}_2 - H_{12}\omega_x = M_{z12} + H_{12}\sigma_2 \omega_y; \\
 & B\dot{\omega}_y + f_y \omega_y + H_{21}\dot{\tau}_1 - H_{22}\dot{\tau}_2 + k_2 F_2(\tau_1 - \tau_2) = M_y; \\
 & C'_{21}\dot{\tau}_1 + f_{21}\dot{\tau}_1 - H_{21}\omega_y = M_{z21} - H_{21}\tau_1 \omega_x; \\
 & C'_{22}\dot{\tau}_2 + f_{22}\dot{\tau}_2 + H_{22}\omega_y = M_{z22} + H_{22}\tau_2 \omega_x; \\
 & C\dot{\omega}_z + f_z \omega_z + H_{31}\dot{\chi}_1 - H_{32}\dot{\chi}_2 + k_3 F_3(\chi_1 - \chi_2) = M_z; \\
 & C'_{31}\dot{\chi}_1 + f_{31}\dot{\chi}_1 - H_{31}\omega_z = M_{x31} - H_{31}\chi_1 \omega_y; \\
 & C'_{32}\dot{\chi}_2 + f_{32}\dot{\chi}_2 + H_{32}\omega_z = M_{x32} + H_{32}\chi_2 \omega_y,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где A, B, C – моменты инерции платформы совместно с подвесом относительно осей X, Y, Z соответственно; $f_x, f_y, f_z, f_{11}, f_{21}, f_{31}$ ($i=1,2$) – коэффициенты моментов вязкого трения на осях платформы и осях подвеса гироскопов; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости платформы на оси X, Y, Z ; σ, τ, χ – углы прецессии гироскопов; $C'_{11}, C'_{21}, C'_{31}$ – моменты инерции гироскопов относительно осей прецессии; H_{11}, H_{21}, H_{31} – кинетические моменты роторов гироскопов; M_x, M_y, M_z – проекции внешних моментов на оси стабилизации;

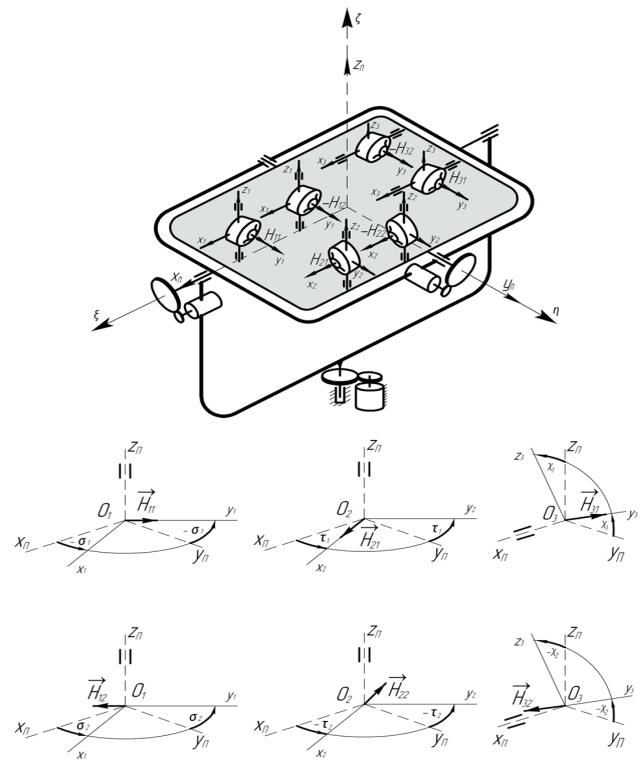


Рис. 1. Кинематическая схема трехосной гиростабилизированной платформы с двухканальной автокомпенсацией влияния внешних помех

$M_{x1i}, M_{y2i}, M_{z3i}$ – проекции внешних моментов на оси прецессии; $F_1(\sigma_1 - \sigma_2), F_2(\tau_1 - \tau_2), F_3(\chi_1 - \chi_2)$ – функции, характеризующие зависимость между моментами стабилизирующих двигателей и соответствующими углами прецессии;

$$\begin{aligned}
 & M_{z1i} = -C'_{1i}\dot{\omega}_z - M_{T1i}\text{sign}\dot{\sigma}_i + M_{1i}; \\
 & M_{z2i} = -C'_{2i}\dot{\omega}_z - M_{T2i}\text{sign}\dot{\tau}_i + M_{2i}; \\
 & M_{x3i} = -C'_{3i}\dot{\omega}_x - M_{T3i}\text{sign}\dot{\chi}_i + M_{3i}; \quad i=1,2.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Считаем M_x, M_y, M_z заданными гармоническими функциями времени:

$$\begin{aligned} M_x &= M_x^0 \sin \gamma_1 t; \quad M_y = M_y^0 \sin(\gamma_2 t + \eta); \\ M_z &= M_z^0 \sin(\gamma_3 t + \varepsilon). \end{aligned} \quad (3)$$

Ограничимся рассмотрением только двух связанных каналов стабилизации, которым соответствуют первые шесть уравнений системы (1). Решения их будем искать методом последовательных приближений в виде:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \omega_x^0 + \%_1 + \dots; \quad \sigma_2 = \sigma_2^0 + \delta_2'' + \dots; \\ \omega_y &= \omega_y^0 + \#_1 + \dots; \quad \tau_1 = \tau_1^0 + \xi_1' + \dots; \\ \sigma_1 &= \sigma_1^0 + \delta_1' + \dots; \quad \tau_2 = \tau_2^0 + \xi_2'' + \dots. \end{aligned} \quad (4)$$

Первое приближение. В первом приближении уравнения двух каналов стабилизации распадаются на следующие две несвязанные подсистемы:

$$\begin{aligned} A\dot{\omega}_x^0 + f_x \omega_x^0 - H_{11} \dot{\sigma}_1^0 + H_{12} \dot{\sigma}_2^0 - k_1 F_1 (\sigma_1^0 - \sigma_2^0) &= M_x; \\ C'_{11} \dot{\sigma}_1^0 + f_{11} \sigma_1^0 + H_{11} \omega_x^0 &= 0; \\ C'_{12} \dot{\sigma}_2^0 + f_{12} \sigma_2^0 - H_{12} \omega_x^0 &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B\dot{\omega}_y^0 + f_y \omega_y^0 + H_{21} \dot{\tau}_1^0 - H_{22} \dot{\tau}_2^0 + k_2 F_2 (\tau_1^0 - \tau_2^0) &= M_y; \\ C'_{21} \dot{\tau}_1^0 + f_{21} \tau_1^0 - H_{21} \omega_y^0 &= 0; \\ C'_{22} \dot{\tau}_2^0 + f_{22} \tau_2^0 + H_{22} \omega_y^0 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решения систем уравнений (5) и (6) при гармонических воздействиях легко получить используя частотные характеристики системы –

$$\begin{aligned} \omega_x^0 &= M_x^0 A_1(\gamma_1) \sin[\gamma_1 t + \varphi_1(\gamma_1)]; \\ \sigma_1^0 &= M_x^0 A_2(\gamma_1) \sin[\gamma_1 t + \varphi_2(\gamma_1)]; \\ \sigma_2^0 &= M_x^0 A_3(\gamma_1) \sin[\gamma_1 t + \varphi_3(\gamma_1)]; \\ \omega_y^0 &= M_y^0 A_4(\gamma_2) \sin[\gamma_2 t + \varphi_4(\gamma_2) + \eta]; \\ \tau_1^0 &= M_y^0 A_5(\gamma_2) \sin[\gamma_2 t + \varphi_5(\gamma_2) + \eta]; \\ \tau_2^0 &= M_y^0 A_6(\gamma_2) \sin[\gamma_2 t + \varphi_6(\gamma_2) + \eta], \end{aligned} \quad (7)$$

где $A_i(\gamma_1), A_i(\gamma_2), \varphi_i(\gamma_1), \varphi_i(\gamma_2)$ – соответственно амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики тракта между входным воздействием и рассматриваемой выходной величиной ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

Структурные схемы платформы в линейном приближении представим на рис. 2. Связи, обозначенные пунктиром – общая жесткая отрицательная обратная связь.

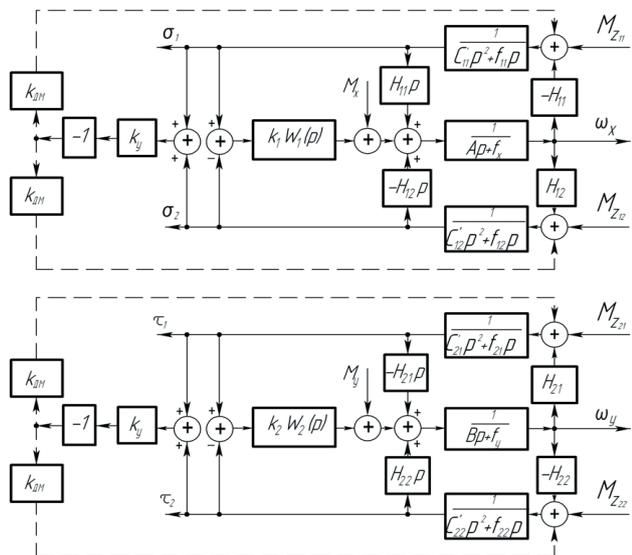


Рис. 2. Блок-схема двух каналов стабилизации. Первое приближение

В соответствии со структурными схемами, передаточные функции платформы имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi_1(p) &= \frac{\omega_x^0}{M_x(p)} = \frac{(C'_{11}p^2 + f_{11}p)(C'_{12}p^2 + f_{12}p)}{\alpha}; \\ \Phi_2(p) &= \frac{\sigma_1^0}{M_x(p)} = \frac{-H_{11}(C'_{12}p^2 + f_{12}p)}{\alpha}; \\ \Phi_3(p) &= \frac{\sigma_2^0}{M_x(p)} = \frac{H_{12}(C'_{11}p^2 + f_{11}p)}{\alpha}; \\ \Phi_4(p) &= \frac{\omega_y^0}{M_y(p)} = \frac{(C'_{21}p^2 + f_{21}p)(C'_{22}p^2 + f_{22}p)}{\beta}; \\ \Phi_5(p) &= \frac{\tau_1^0}{M_y(p)} = \frac{H_{21}(C'_{22}p^2 + f_{22}p)}{\beta}; \\ \Phi_6(p) &= \frac{\tau_2^0}{M_y(p)} = \frac{-H_{22}(C'_{21}p^2 + f_{21}p)}{\beta}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha &= AC'_{11}C'_{12}p^5 + (AC'_{11}f_{12} + AC'_{12}f_{11} + C'_{11}C'_{12}f_x)p^4 + \\ &+ (Af_{11}f_{12} + C'_{11}f_{12}f_x + \\ &+ C'_{12}f_{11}f_x + C'_{12}H_{11}^2 - C'_{11}H_{12}^2)p^3 + [f_{11}f_{12}f_x + C'_{12}H_{11}k_1 W_1'(p) - \\ &- C'_{11}H_{12}k_1 W_1'(p) + f_{12}H_{11}^2 - f_{11}H_{12}^2] p^2 +; \\ &+ [f_{12}k_1 W_1'(p)H_{11} - f_{11}k_1 W_1''(p)H_{12}]p \\ \beta &= BC'_{21}C'_{22}p^5 + (BC'_{21}f_{22} + BC'_{22}f_{21} + C'_{21}C'_{22}f_y)p^4 + \\ &+ (Bf_{21}f_{22} + C'_{21}f_{22}f_y + \\ &+ C'_{22}f_{21}f_y + C'_{22}H_{21}^2 - C'_{21}H_{22}^2)p^3 + [f_{21}f_{22}f_y + C'_{22}H_{21}k_2 W_2'(p) - \\ &- C'_{21}H_{22}k_2 W_2'(p) + f_{22}H_{21}^2 - f_{21}H_{22}^2] p^2 +; \\ &+ [f_{22}k_2 W_2'(p)H_{21} - f_{21}k_2 W_2''(p)H_{22}]p \end{aligned} \quad (9)$$

$W_1'(p), W_1''(p), W_2'(p), W_2''(p)$ – передаточные функции цепей стабилизации, являющиеся изображениями функций $F_1(\sigma_1^0), F_1(\sigma_2^0), F_2(\tau_1^0), F_2(\tau_2^0)$; передаточные функции (8) составлялись в предположении линейности характеристик стабилизирующих двигателей.

Из выражений (7) следует, что постоянных составляющих угловых скоростей ω_x и ω_y первое приближение не дает.

Второе приближение. С учетом соотношений (4), уравнения второго приближения запишем в виде:

$$\begin{aligned} A\%_1 + f_x \%_1 - H_{11} \delta_1' + H_{12} \delta_2'' - k_1 F_1 (\delta_1' - \delta_2'') &= M_x; \\ C'_{11} \delta_1' + f_{11} \delta_1' + H_{11} \%_1 &= M_{z11} - H_{11} \sigma_1^0 \omega_y^0; \\ C'_{12} \delta_2'' + f_{12} \delta_2'' - H_{12} \%_1 &= M_{z12} + H_{12} \sigma_2^0 \omega_y^0; \\ B\dot{\xi}_1 + f_y \dot{\xi}_1 + H_{21} \xi_1' - H_{22} \xi_2'' + k_2 F_2 (\xi_1' - \xi_2'') &= M_y; \\ C'_{21} \xi_1' + f_{21} \xi_1' - H_{21} \dot{\xi}_1 &= M_{z21} - H_{21} \tau_1^0 \omega_x^0; \\ C'_{22} \xi_2'' + f_{22} \xi_2'' + H_{22} \dot{\xi}_2 &= M_{z22} + H_{22} \tau_2^0 \omega_x^0. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя значения (2), (7), в уравнения (10) и выделяя постоянные составляющие моментов, обусловленные наличием перекрестных связей, определим угловые скорости ухода платформы относительно осей стабилизации –

$$\begin{aligned} \omega_x^* &= X_1^* = \\ &= \left[-\frac{1}{2}H_{11} M_x^0 M_y^0 A_2(\gamma_1) A_4(\gamma_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_4 - \eta) - C'_{11} \dot{\omega}_z - \right. \\ &\quad \left. - M_{T11} \text{sign} \dot{\sigma}_1^0 + M_{D11} \right] \Phi_7(0) - \\ &\quad \left[\frac{1}{2}H_{12} M_x^0 M_y^0 A_3(\gamma_1) A_4(\gamma_2) \times \right. \\ &\quad \left. \cos(\varphi_3 - \varphi_4 - \eta) - C'_{12} \dot{\omega}_z - M_{T12} \text{sign} \dot{\sigma}_2^0 + M_{D12} \right] \Phi_8(0); \quad (11) \\ \omega_y^* &= Y_1^* = \left[\frac{1}{2}H_{21} M_x^0 M_y^0 A_1(\gamma_1) A_5(\gamma_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_5 - \eta) - C'_{21} \dot{\omega}_z - \right. \\ &\quad \left. - M_{T21} \text{sign} \dot{\tau}_1^0 + M_{D21} \right] \Phi_9(0) - \\ &\quad \left[-\frac{1}{2}H_{22} M_x^0 M_y^0 A_6(\gamma_2) A_1(\gamma_1) \times \right. \\ &\quad \left. \cos(\varphi_1 - \varphi_6 - \eta) - C'_{22} \dot{\omega}_z - M_{T22} \text{sign} \dot{\tau}_2^0 + M_{D22} \right] \Phi_{10}(0), \quad (12) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_7(p) &= \frac{X_1(p)}{M_{z11}^n(p)} = \frac{(C'_{12} p^2 + f_{12} p) [H_{11} p + k_1 W_1'(p)]}{\alpha}; \\ \Phi_8(p) &= \frac{X_1(p)}{M_{z12}^n(p)} = \frac{(C'_{11} p^2 + f_{11} p) [-H_{12} p + k_1 W_1''(p)]}{\alpha}; \\ \Phi_9(p) &= \frac{Y_1(p)}{M_{z21}^n(p)} = \frac{(C'_{22} p^2 + f_{22} p) [-H_{21} p + k_2 W_2'(p)]}{\beta}; \\ \Phi_{10}(p) &= \frac{Y_1(p)}{M_{z22}^n(p)} = \frac{(C'_{21} p^2 + f_{21} p) [H_{22} p + k_2 W_2''(p)]}{\beta}; \\ M_{z1i}^n &= M_{z1i} \mp H_{1i} \sigma_i^0 \omega_y^0; \quad M_{z2i}^n = M_{z2i} \mp H_{2i} \tau_i^0 \omega_x^0; \quad (i=1, 2). \quad (13) \end{aligned}$$

Формулы (11) и (12) получены в предположении равенства частот γ_1 и γ_2 возмущающих моментов M_x и M_y . При большом различии γ_1 и γ_2 уходы платформы имеют характер колебаний разностной и суммарной частот.

Как видно из выражений (11) и (12), применение двух гироскопов по каждой оси стабилизации позволяет значительно уменьшить собственные уходы платформы, обусловленные перекрестными связями по гироскопическому моменту. В случае равенства параметров гироскопов (за исключением знаков кинематических моментов, т.е. $H_{11} = -H_{12} = H_1$) первые слагаемые в выражениях (11) и (12) превращаются в

нули и погрешности ГСП будут определяться лишь вредными моментами, действующими по осям прецессии гироскопов.

4. Выводы

Построенные расчетные модели позволяют не только проанализировать и численно оценить степень влияния перекрестных связей по каналам стабилизации, но и обобщить выводы в плане целесообразности применения того, или иного, метода автокомпенсации вообще.

Литература

1. Назаров, Б.И. О погрешностях гиросtabilизаторов [Текст] / Б.И. Назаров // Техническая кибернетика. – 1963. – №2. – С. 71-75.
2. Ткачев, Л. И. Системы инерциальной ориентировки [Текст]: уч. пособие / Л.И. Ткачев: МЭИ, 1973. – 213 с.
3. Ковалец, О.Я. Влияние дифракционных явлений на погрешность системы коррекции гирогоризонта [Текст] / О.Я. Ковалец // Вісник НТУУ «КПІ»: Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2009. – Вип. 38. – С. 10-16.
4. А.с. 256045 СССР, МПК G01p. Гиротахометр [Текст] / Одинцов А.А. (СССР). – 1200779/18-10; заявл. 22.11.67; опубл. 04.11.69, Бюл. №34. – 1с.: ил.
5. Мельник, В.Н. Нелинейные колебания в полиагрегатном подвесе гироскопа [Текст]: моногр. / В.Н. Мельник, В.В. Карачун; Нац. техн. ун-т Украины «КПИ». – К.: «Корнейчук», 2008. – 104с. – Библиогр.: с. 80-82. – ISBN 978-966-7599-48-5.
6. Назаров, Б. И. О погрешностях двухстепенного интегрирующего гироскопа, вызванных колебаниями основания [Текст] / Б.И. Назаров // Изв. ВУЗов СССР, «Приборостроение». – 1960. – Т.3, № 6. – С. 17-24.
7. Арутюнов, С.С. О погрешностях двухстепенного интегрирующего гироскопа, вызванных угловыми колебаниями объекта [Текст] / С.С. Арутюнов // Изв. ВУЗов СССР, «Приборостроение». – 1959. – № 2. – С. 15-19.
8. Одинцов, А.А. Об уменьшении погрешностей гиросtabilизаторов от перекрестных связей [Текст] / А.А. Одинцов, В.В. Карачун // Прикл. механика. – 1973. – Т. IX, вып. 10 – С. 112-118.