

УДК 629.7.05

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ГИРОВЕРТИКАЛИ С ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

Виктор Иванович ГАЛКИН, к. т. н., с. н. с.,

Александр Владимирович КОНДРАТЬЕВ,

Николай Викторович КРОТОВ,

ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»

E-mail: inbox@aomiea.ru

В статье изложены результаты исследований методом математического моделирования автономной микромеханической гирвертикали с интегральной коррекцией по линейной скорости, по воздушной скорости, с демпфированием и без демпфирования.

Ключевые слова: автономная гирвертикаль, интегральная коррекция, демпфирование, период Шулера, воздушная скорость, микромеханические датчики.

RESEARCH OF AUTONOMOUS MICROMECHANICAL VERTICAL GYRO WITH INTEGRAL CORRECTION

Victor I. GALKIN, PhD in Engineering,

Alexander V. KONDRATYEV,

Nicolay V. KROTOV,

'Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC

E-mail: inbox@aomiea.ru

The article presents the results of research by mathematical modelling of autonomous micromechanical vertical gyro with integral linear velocity correction, integral airspeed correction, with and without damping.

Keywords: autonomous vertical gyro, integral correction, damping, Schuler period, airspeed, micromechanical sensors.

Микромеханические гирвертикали и курсовертикали благодаря таким преимуществам, как минимальные размеры, высокая надежность, малое энергопотребление, невысокая стоимость, находят применение в широком классе летательных аппаратов (ЛА) [1, 2], но особенно актуально их применение в беспилотных летательных аппаратах. При этом одним из основных требований, предъявляемых к гирвертикалям такого типа, является их автономность — возможность обеспечения заданных характеристик без связи с внешними источниками информации, находящимися вне борта летательного аппарата (ЛА).

Основным преимуществом интегральной коррекции является возможность корректировки угловых погрешностей при любых углах полета ЛА и широком диапазоне действующих на него линейных ускорений. В то же время нечувствительность микромеханических датчиков к угловым скоростям облета и вращения Земли вызывает необходимость поиска оптимальных способов компенсации угловых погрешностей.

В настоящей статье приводятся результаты исследования методом математического моделирования автономной микромеханической гирвертикали с несколькими схемами структурного построения интегральной коррекции угловых погрешностей:

- без использования дополнительной информации;
- без использования дополнительной информации, но с осуществлением демпфирования колебаний угловой погрешности;
- с использованием дополнительной информации от бортового датчика воздушных скоростей и демпфированием колебаний угловой погрешности.

Структурно-функциональная блок-схема гирвертикали представлена на рис. 1 (стр. 68).

При построении гирвертикали классического типа [3] с интегральной коррекцией по линейной скорости ЛА без использования дополнительной информации в результате нечувствительности гироскопических датчиков к угловым скоростям облета Земли угловые ошибки будут вызываться не только погрешностями микромеханических датчиков, но и учетом угловых скоростей облета Земли:

$$\omega_x(n_3) = -\frac{V_Y(n_3)}{R}; \quad \omega_y = \frac{V_X(n_3)}{R},$$

где: $V_{x,y}(n_3)$ — линейные скорости на инерциальных осях, включающие в себя как реальные линейные скорости облета Земли, так и ошибки, вызванные погрешностями гироскопов и акселерометров; $\omega_{x,y}(n_3)$ — корректирующие угловые скорости; R — радиус Земли.

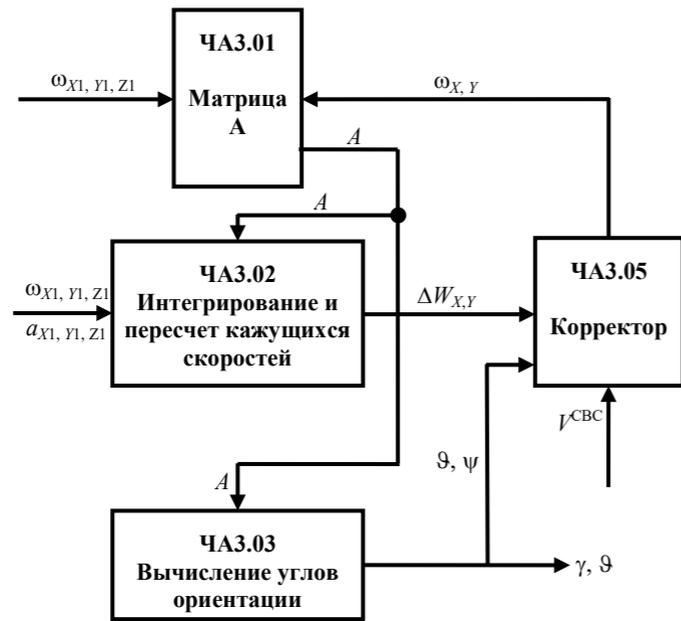


Рис. 1. Структурно-функциональная блок-схема автономной гировертикали с интегральной коррекцией

Такая схема коррекции представляет собой недемпфированную систему регулирования, в которой угловые погрешности колеблются с периодом Шулера и амплитудой, пропорциональной погрешностям микромеханических датчиков [4].

$$\Delta\vartheta_{\omega} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{sch}} \sin \omega_{sch} t; \quad \Delta\vartheta_a = \Delta \frac{\Delta a}{R \omega_{sch}^2} (1 - \cos \omega_{sch} t),$$

где: $\Delta\omega$ — погрешность измерения микромеханическими гироскопами с учетом угловой скорости облета Земли; Δa — погрешность измерения микромеханическими акселерометрами; ω_{sch} — угловая частота Шулера.

К существенному улучшению точностных характеристик гировертикали привело введение демпфирования колебаний угловой погрешности.

В уравнения для расчета линейных скоростей вводится демпфирующее звено:

$$V_{x,y}(n_3) = V_{x,y}(n_3 - 1) - K_d V_{xy}(n_3 - 1) h_3 + \Delta W_{x,y}(n_3),$$

где: $K_d V_{xy}(n_3 - 1) h_3$ — демпфирующее звено; K_d — коэффициент динамического усиления (демпфирования); h_3 — временной интервал тактовой частоты вычисления углов; n_3 — номер такта.

Для получения оптимальных результатов в уравнение расчета корректирующей угловой скорости вводится коэффициент статического усиления K_c :

$$\omega_x(n_3) = -K_c \frac{V_y(n_3)}{R}; \quad \omega_y = K_c \frac{V_x(n_3)}{R}.$$

При этом очень важен оптимальный выбор коэффициентов демпфирования K_d и усиления K_c .

На рис. 2 показан пример выбора оптимального коэффициента демпфирования для коэффициента усиления $K_c = 16$.

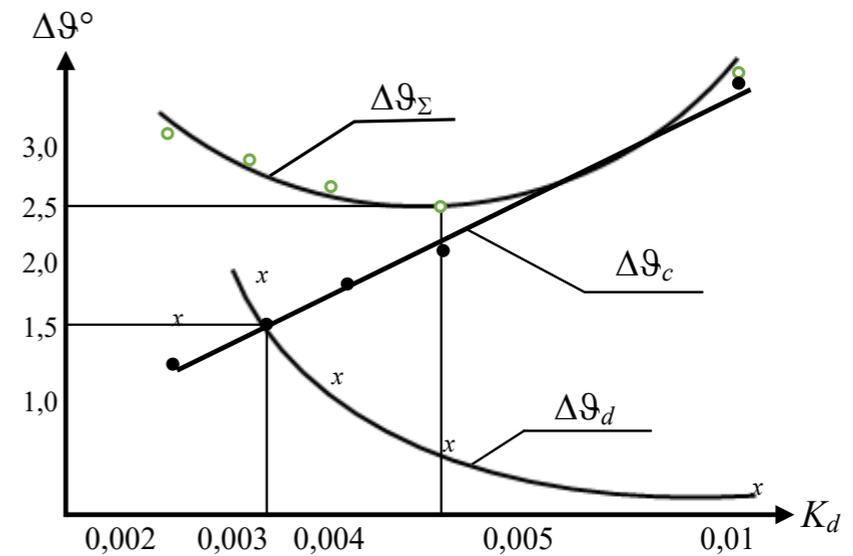


Рис. 2. Графики зависимости статической $\Delta\vartheta_c$, динамической $\Delta\vartheta_d$ и максимальной (суммарной) угловой погрешности $\Delta\vartheta_{\Sigma}$ от величины демпфирующего коэффициента для $K_c = 16$

Как следует из графиков, оптимальным коэффициентом демпфирования для статического коэффициента усиления $K_c = 16$ является $K_d = 0,003$, так как при этом величина статической и динамической угловых погрешностей одинаковы: $\Delta\vartheta_c = \Delta\vartheta_d = 1,5^\circ$, но для минимальной суммарной ошибки $\Delta\vartheta_{\Sigma} = 2,5^\circ$ оптимальным является $K_d = 0,005$. То есть оптимум лежит между этими двумя величинами: $K_d = 0,003 \div 0,005$.

Недостатком такой системы является увеличение угловых погрешностей при разгонах и торможениях ЛА с большими ускорениями.

На рис. 3 (стр. 70) приведены графики зависимости угловой погрешности при разных величинах линейных ускорений, действующих на ЛА. $\Delta\vartheta_c$ статическая составляющая угловой погрешности; $\Delta\vartheta_m$ максимальная погрешность с учетом динамической составляющей.

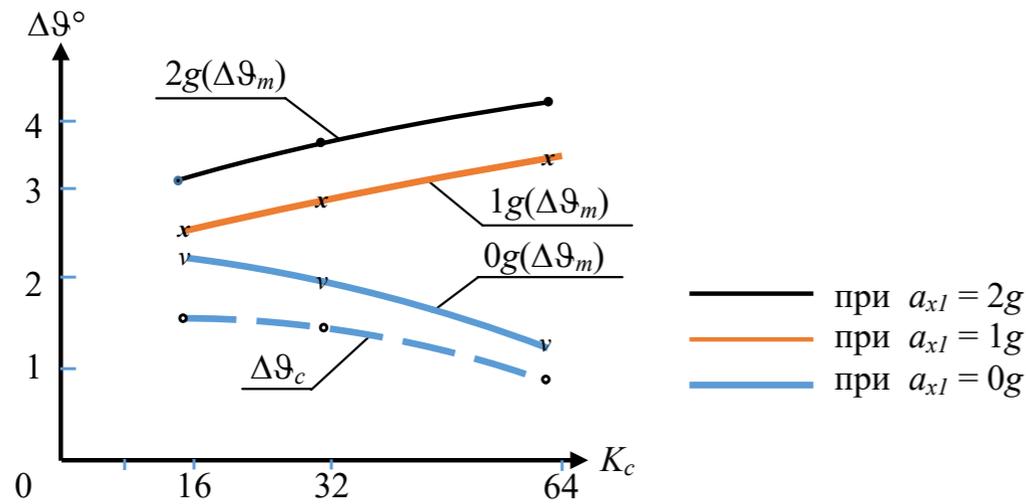


Рис. 3. Графики зависимости угловой погрешности $\Delta\theta$ от K_c при разных величинах линейных ускорений, действующих на ЛА в течение 15 с

Как видно из приведенных графиков, при использовании оптимальной пары коэффициентов усиления $K_c = 16$, $K_d = 0,003$ при ускорении $2g$ максимальная угловая погрешность не превышает 3° с учетом динамического переходного режима, а угловая погрешность в статических режимах полета не превышает 2° .

В режимах работы с большими ускорениями, когда угловая погрешность превышает допустимую, рекомендуется отключать обратную связь на время действия разгонного ускорения. Время отключения обратной связи ограничивается допустимой ошибкой измерения углов крена и тангажа, так как угловая погрешность от микромеханических гироскопов будет возрастать пропорционально этому времени. При средних значениях откалиброванных погрешностей микромеханических гироскопов $0,007^\circ/\text{с}$ и допустимой угловой ошибки $(2 \div 4)^\circ$ время отключения обратной связи не должно превышать $(300 \div 600)$ с.

Дальнейшее совершенствование автономной гировертикали возможно при использовании дополнительной информации, не нарушающей ее автономности. Например, при использовании информации от датчика воздушной скорости, являющегося, как правило, неотъемлемой частью ЛА.

В этом случае удается избавиться от ошибки, вызванной учетом облета Земли. Линейная скорость, измеренная датчиком воздушной скорости, перепроектируется на инерциальные оси гировертикали. Находится разность линейных скоростей $z_{1,2}(n_3)$, измеренных датчиком воздушной скорости $V_{(x,y)}^{\text{CBC}}(n_3)$, и рассчитанной по показаниям микромеханических датчиков $V_{x,y}(n_3)$:

$$Z_{1,2}(n_3) = V_{xy}(n_3) - V_{xy}^{\text{CBC}}(n_3).$$

Полученный результат используется в обратной связи в виде корректирующих угловых скоростей:

$$\omega_x(n_3) = -K_c \frac{z_2(n_3)}{R}; \quad \omega_y(n_3) = K_c \frac{z_1(n_3)}{R}.$$

При этом по сравнению с классической коррекцией угловая погрешность уменьшается в несколько раз, а введение демпфирования позволяет обеспечивать заданную точность измерений и в режимах разгона и торможения ЛА.

На рис. 4 приведены графики изменения угловой погрешности гировертикали при неподвижном ЛА (а) и в режимах разгона и торможения (б) $K_c = 16$, $K_d = 0,003$ 1/с при погрешностях датчиков $\Delta_{ax1} = 0,01$ g; $\Delta\omega_{z1} = 0,0071^\circ/\text{с}$.

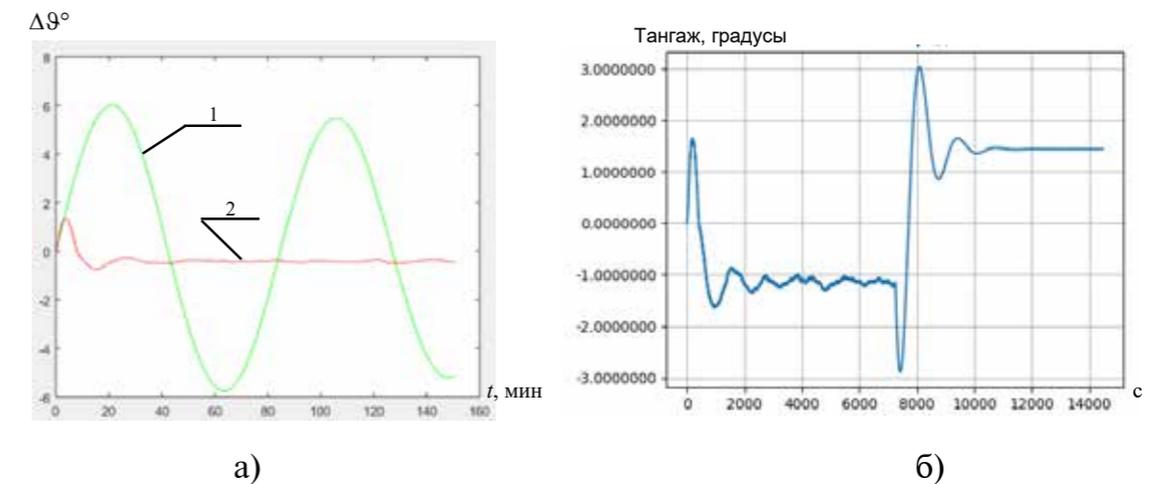


Рис. 4. Графики угловой погрешности тангажа $\Delta\theta = f(t)$:

- а) при классической схеме коррекции и неподвижном ЛА:
1 — график без демпфирования; 2 — график с демпфированием линейной скорости;
- б) при использовании дополнительной информации от датчика воздушной скорости с демпфированием линейной скорости при разгоне ЛА с ускорением $2g$ до 300 м/с, равномерном полете 7000 с и торможением с ускорением $(-2g)$ до полной остановки ЛА.

Заключение

Выбор способа интегральной коррекции зависит от маневренности летательного аппарата, уровня точностных характеристик используемых микромеханических датчиков и заданной точности определения углов тангажа и крена.

Наиболее эффективна интегральная коррекция при использовании дополнительной информации от бортового датчика воздушных скоростей с демпфированием угловых колебаний. При этом повышение точности измерения углов тангажа и крена не нарушает автономности работы гировертикали.

Литература

1. Кузнецов А. Г., Абутидзе З. С., Портнов Б. И., Галкин В. И., Калик А. А. Микромеханические датчики для пилотажных систем управления. // Гироскопия и навигация, 2010. № 2 (69), – С. 50 – 56.
2. Галкин В. И. Гироскопические приборы на микромеханических датчиках – Проблемы и пути их решения, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, ISBN: 978-620-2-7965-5, 2020. – 165 с.
3. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем: Часть I: математические модели инерциальной навигации. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 136 с. ISBN 978-5-317-03803-8.
4. Инерциальная навигация, под редакцией К. Ф. О'Доннела, перевод с английского, изд. «Наука», 1969. – 592 с.