

В. В. Алешкин, д-р техн. наук, проф., aleshkinvv@ya.ru,

П. К. Плотников, д-р техн. наук, проф., pribor@sstu.ru,

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов

Экспериментальное подтверждение снижения погрешностей блока гироскопических измерителей угловой скорости за счет алгоритмической компенсации

Экспериментально подтверждается эффективность асимптотического подхода к решению задачи определения компонентов вектора абсолютной угловой скорости объекта по информации блока трех двухстепенных гироскопов. Применение алгоритмов, построенных на основе уравнений обратной задачи для блока трех гироскопических измерителей угловой скорости, позволяет значительно снизить как постоянные составляющие, так и мгновенные значения погрешностей оценивания угловых скоростей.

Ключевые слова: блок датчиков, методические погрешности, алгоритмическая компенсация, результаты экспериментов

Введение

В работах [1, 2] показано, что в качестве алгоритма оценивания параметров движения объекта могут применяться уравнения обратной задачи для блока трех двухстепенных гироскопов. При выполнении условий существования, единственности и асимптотической устойчивости решений применение этих уравнений для оценки компонентов вектора абсолютной угловой скорости позволяет снизить погрешности блока гироскопических измерителей угловой скорости (ГИУС), учтенные в исходной математической модели блока. Экспериментальную оценку эффективности предложенных

алгоритмов проводили для блока трех ГИУС, ортогонально расположенных в блоке, с применением упрощенных алгоритмов компенсации погрешностей. Ориентация осей гироскопов (X_i, Y_i, Z_i) ($i = 1, 2, 3$) относительно осей блока (X, Y, Z) приведена на рис. 1.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальную работу с блоком трех двухстепенных гироскопов проводили в четыре этапа.

На первом этапе определяли масштабные коэффициенты K_M^i и коэффициенты передачи датчиков углов K_β^i каждого из гироскопов блока. При этом

сигналы с датчиков углов U_β^i ($i = 1, 2, 3$) измеряли после демодуляции. Для гироскопов, используемых в эксперименте, получены следующие значения коэффициентов:

$$K_M^1 = 171,42 \text{ МВ} \cdot \text{с}/^\circ, K_\beta^1 = 605 \text{ МВ}/^\circ,$$

$$K_M^2 = 170,7 \text{ МВ} \cdot \text{с}/^\circ, K_\beta^2 = 780 \text{ МВ}/^\circ,$$

$$K_M^3 = 166,29 \text{ МВ} \cdot \text{с}/^\circ, K_\beta^3 = 449 \text{ МВ}/^\circ.$$

На втором этапе исследовали точность компенсации погрешностей перекрестных связей и нелинейностей масштабных коэффициентов ГИУС. В качестве алгоритма работы вычислительного устройства использовали конечные выражения, полученные из

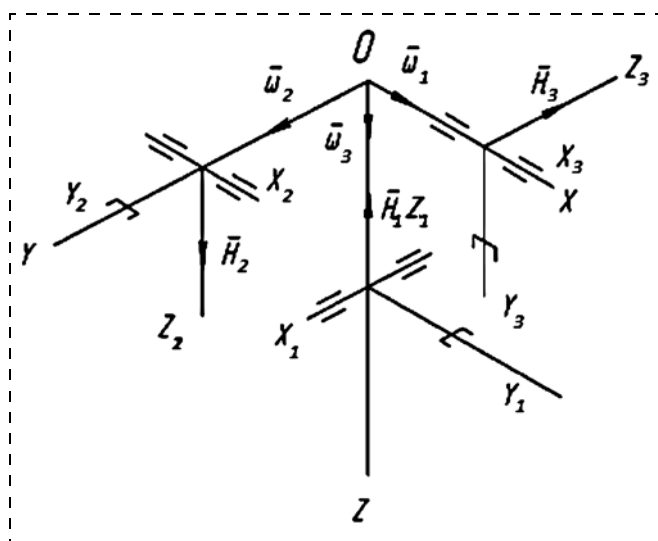


Рис. 1. Ориентация осей ГИУС в блоке

уравнений, учитывающих указанные погрешности. В соответствии с ориентацией осей приборов в блоке эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} -\omega_1 \cos \beta^1 - \omega_3 \sin \beta^1 &= \frac{Q^1}{H^1} = \frac{U_M^1}{K_M^1}; \\ -\omega_2 \cos \beta^2 + \omega_3 \sin \beta^2 &= \frac{Q^2}{H^2} = \frac{U_M^2}{K_M^2}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\omega_3 \cos \beta^3 - \omega_2 \sin \beta^3 &= \frac{Q^3}{H^3} = \frac{U_M^3}{K_M^3}; \\ \beta^1 &= \frac{U_\beta^1}{K_\beta^1}; \beta^2 = \frac{U_\beta^2}{K_\beta^2}; \beta^3 = \frac{U_\beta^3}{K_\beta^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H^i ($i = 1, 2, 3$) — кинетический момент ротора i -го ГИУС; Q^i — момент обратной связи; U_M^i — напряжения, снимаемые с эталонных резисторов, соединенных последовательно с обмотками датчиков моментов; ω_j ($j = 1, 2, 3$) — проекции вектора абсолютной угловой скорости объекта на оси блока; β^i — углы относительных поворотов чувствительных элементов ГИУС.

Решения системы (1) относительно угловых скоростей $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, вычисленные значения которых обозначим V_1, V_2, V_3 , полученные по формулам Крамера, имеют вид

$$V_j = \frac{\Delta_j}{\Delta},$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= P_2 \sin \beta^1 \sin \beta^3 + \\ &+ P_1 (\cos \beta^2 \cos \beta^3 + \sin \beta^2 \sin \beta^3) + P_3 \cos \beta^2 \sin \beta^1; \\ \Delta_2 &= P_2 \cos \beta^3 \cos \beta^1 + P_3 \sin \beta^2 \cos \beta^1; \\ \Delta_3 &= -P_2 \sin \beta^3 \cos \beta^1 + P_3 \cos \beta^1 \cos \beta^2; \\ \Delta &= -\cos \beta^1 \cos \beta^2 \cos \beta^3 - \cos \beta^1 \sin \beta^2 \sin \beta^3; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta^1 &= \frac{U_\beta^1}{K_\beta^1}; \beta^2 = \frac{U_\beta^2}{K_\beta^2}; \beta^3 = \frac{U_\beta^3}{K_\beta^3}; \\ P_1 &= \frac{U_M^1}{K_M^1}; P_2 = \frac{U_M^2}{K_M^2}; P_3 = \frac{U_M^3}{K_M^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения (3), (4) являются алгоритмом вычисления оценок угловых скоростей с компенсацией погрешностей перекрестных связей и нелинейностей масштабных коэффициентов блока ГИУС.

Эксперимент проводился следующим образом. Блок гироскопов с помощью специального кронштейна разворачивался относительно платформы поворотного стола установки проверки гироскопов

(УПГ) на два фиксированных угла вокруг взаимно перпендикулярных осей для создания трех проекций угловой скорости вращения платформы на оси чувствительности приборов. Затем включался двигатель УПГ, и информация ГИУС и дискретного фотоэлектрического датчика угла поворота платформы записывалась в память машины. По окончании записи ЦВМ обрабатывала информацию. При этом с частотой 500 Гц вычислялись значения проекций угловой скорости вращения платформы ω_j ($j = 1, 2, 3$) на оси чувствительности ГИУС. Показания U_M^1, U_M^2, U_M^3 ГИУС с помощью масштабных коэффициентов K_M^1, K_M^2, K_M^3 пересчитывались в угловые скорости $V_j^* = P_j$ ($j = 1, 2, 3$), измеренные ГИУС. Наконец, по алгоритму (3), (4) вычислялись значения угловых скоростей V_j ($j = 1, 2, 3$) с компенсацией методических погрешностей.

Несовершенство привода УПГ приводило к тому, что угловая скорость платформы колебалась около заданного значения и, по существу, являлась реализацией стационарного случайного процесса. Поэтому для анализа экспериментальных данных применяли методы корреляционного анализа случайных процессов [3].

Результаты экспериментов

Номинальные значения компонент угловой скорости задавали следующими:

$$\omega_1 \approx -3,51^\circ/\text{с}; \omega_2 \approx 3,51^\circ/\text{с}; \omega_3 \approx -2,86^\circ/\text{с}.$$

С этими угловыми скоростями было снято 20 реализаций. Для вычисления угловой скорости по показаниям блока ГИУС и алгоритму (3), (4) использовали показания, разделенные интервалом времени 1 с, что примерно в 5 раз превышает время затухания автокорреляционных функций. По всем реализациям вычисляли оценки математических ожиданий $\tilde{m}_z$, средних квадратичных отклонений $\tilde{\sigma}_z$ и дисперсий $\tilde{D}_z$ единичного результата при N изменениях и средних квадратичных отклонений $\tilde{\sigma}_z(\tilde{m})$ и дисперсий $\tilde{D}_z(\tilde{m})$ оценок математических ожиданий для каждой переменной:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_z &= \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N Z_K; \tilde{D}_z = \tilde{\sigma}_z^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{K=1}^N (Z_K - \tilde{m}_z); \\ \tilde{D}_z(\tilde{m}) &= \frac{1}{N} \tilde{\sigma}_z^2; \tilde{\sigma}_z(\tilde{m}) = \frac{\tilde{\sigma}_z}{\sqrt{N}}. \end{aligned} \quad (5)$$

После этого платформа вращалась в противоположную сторону:

$$\omega_1 \approx 3,51^\circ/\text{с}; \omega_2 \approx -3,51^\circ/\text{с}; \omega_3 \approx 2,86^\circ/\text{с}.$$

Применение алгоритма (3), (4) позволило снизить погрешности определения среднего значения угловой скорости. По множеству реализаций мате-

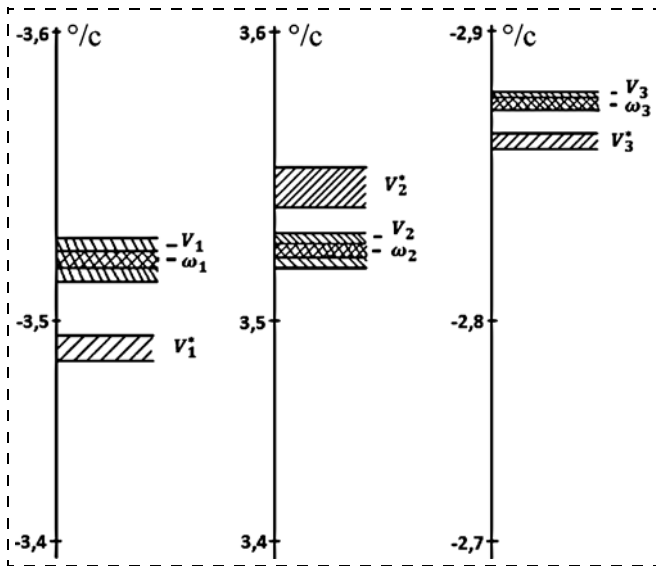


Рис. 2. Доверительные интервалы

матические ожидания погрешностей определения ω_j ($j = 1, 2, 3$) снизились с 0,68 до 0,013 % для компоненты ω_1 , с 0,58 до 0,0052 % — для ω_2 , с 0,6 до 0,0066 % — для ω_3 , т. е. в 52,3, 111,54 и 90,9 раз соответственно. При этом дисперсия значений V_j , вычисленных по алгоритму (3), (4), по отношению к дисперсии показаний ГИУС V_j^* практически не возросла.

Оценим максимально возможные ошибки определения компонент угловой скорости в данных экспериментах. С вероятностью 0,997 показания блока гироскопов V_j^* , а также значения ω_j и V_j будут находиться в интервалах $\tilde{m}_z \pm 3\tilde{\sigma}_z(\tilde{m})$ [4]. На рис. 2 доверительные интервалы изображены графически отдельно для каждой компоненты. Для $\omega < 0$ можно утверждать, что с вероятностью 0,997 максимальные ошибки определения заданных компонент угловой скорости по алгоритму (3), (4) не превысят 0,0416 %, 0,0748 %, 0,0269 %. Максимально возможные погрешности ГИУС составили 0,6959 %, 0,6488 %, 0,6136 %.

Минимально возможные погрешности самих ГИУС составили 0,6433 %, 0,5076 %, 0,5736 %, т. е. в этом случае общие погрешности ГИУС снижены, по крайней мере, в 15,2, 6,7, 21,3 раз.

При $\omega > 0$ минимальные погрешности ГИУС составляют 0,5759 %, 0,3526 %, 0,5568 %. Наибольшие возможные погрешности алгоритма (3), (4) составляют 0,1086 %, 0,187 %, 0,0508 %. Погрешности ГИУС снижены, по крайней мере, в 5,3, 1,9 и 11 раз. Увеличение дисперсии в показаниях ГИУС и решениях V_j при $\omega > 0$ объясняется большей нестабильностью вращения платформы УПГ в эту сторону (дисперсия по ω_j ($j = 1, 2, 3$) в этом случае также возросла на порядок).

На третьем этапе экспериментально исследовали эффективность компенсации погрешностей блока ГИУС в динамических режимах. При этом в алго-

ритме обработки информации гироскопов (3), (4) были учтены члены, содержащие производные углов относительных поворотов гироскопов:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{U_M^1}{K_M^1} + K_\beta^1 \dot{\beta}^1 + K_{\ddot{\beta}}^1 \ddot{\beta}^1; \\ P_2 &= \frac{U_M^2}{K_M^2} + K_\beta^2 \dot{\beta}^2 + K_{\ddot{\beta}}^2 \ddot{\beta}^2; \\ P_3 &= \frac{U_M^3}{K_M^3} + K_\beta^3 \dot{\beta}^3 + K_{\ddot{\beta}}^3 \ddot{\beta}^3. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты K_β^i , $K_{\ddot{\beta}}^i$ в первом приближении задавали в соответствии с номинальными значениями параметров ГИУС $K_\beta^i = 0,0133$, $K_{\ddot{\beta}}^i = 0,0016$ с, а затем уточняли путем сопоставления кривых переходных процессов $V_j(t)$, $V_j^*(t)$ при ступенчатом изменении угловой скорости, имитируемом датчиками моментов ГИУС.

Переходные процессы в каждом ГИУС, задаваемые токами имитации в дополнительных обмотках датчиков моментов, записывались в память ЦВМ.

Мгновенные значения напряжений U_M^i , U_β^i ($i = 1, 2, 3$) снимались с частотой 500 Гц. Затем в каждой точке по формулам разделенных разностей соответствующих порядков вычислялись оценки производных $\dot{\beta}^i$, $\ddot{\beta}^i$ и значения угловых скоростей, имитируемых датчиками моментов. Последние определялись как обычным образом по U_M^i ($i = 1, 2, 3$), так и по алгоритму (3), (6), обеспечивающему снижение динамических погрешностей блока ГИУС. Введение информации по первой и второй производным позволило снизить время первого согласования с 0,022 до 0,014 с, перерегулирование — с 52,78 до 6,95 %. Если учесть задержку сигнала U_β^i в фильтрах нижних частот установки (0,01 с), то время переходного процесса было снижено в 5,5 раз. Вместе с тем, шум квантования сигналов U_β^i по уровню в 12-разрядных АЦП экспериментальной установки приводил к увеличению дисперсии оценок угловой скорости в установившемся режиме, поскольку изменению сигналов U_β^i ($i = 1, 2, 3$) на 0,5 мВ при периоде квантования $T = 0,002$ с соответствуют $\dot{\beta}^i = 0,207^\circ/\text{с}$ и $\ddot{\beta}^i = 206,6^\circ/\text{с}^2$. Учитывая коэффициенты K_β^i , $K_{\ddot{\beta}}^i$, получаем угловые скорости 0,0028 и 0,3306°/с, соответственно, что составляет 0,04 и 5,2 % от $\omega = 6^\circ/\text{с}$. Для снижения дисперсии

в алгоритм обработки был введен пороговый фильтр, который устанавливал $\ddot{\beta}^i \equiv 0$ при изменениях выходных сигналов АЦП на 1 МЗР, соответствующую $U_{\beta}^i = 0,5$ мВ. Это позволило снизить влияние шумов квантования при одновременном повышении качества переходных процессов в оценках.

На заключительном этапе оценивали эффективность компенсации методических погрешностей блока ГИУС при определении мгновенных значений трех компонент вектора угловой скорости платформы, модуль которого изменялся по стационарным случайным законам с математическими ожиданиями, равными $1^\circ/\text{с}$, $2^\circ/\text{с}$, ..., $7^\circ/\text{с}$. Текущие значения $\omega_j(t)$ вычисляли с шагом $0,004$ с. На рис. 3–5 приведены графики изменения компонент угловой

скорости и величин V_j , V_j^* на отрезке времени $t = 0,2 \dots 0,4$ с в одной из реализаций. Точки кривых $V_j^*(t)$ определяли непосредственно по показаниям U_M^i ГИУС. Кривые $V_j(t)$ получены по алгоритмам (3), (6).

На рис. 6–8 приведены графики изменения относительных погрешностей до компенсации $\Delta\omega_j(t)$ и после $\delta\omega_j(t)$.

Интегральные оценки погрешностей вычисляли по формулам

$$\delta V_j^* = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\Delta\omega_j(t)| dt, \quad \delta V_j = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\delta\omega_j(t)| dt$$

($j = 1, 2, 3$).

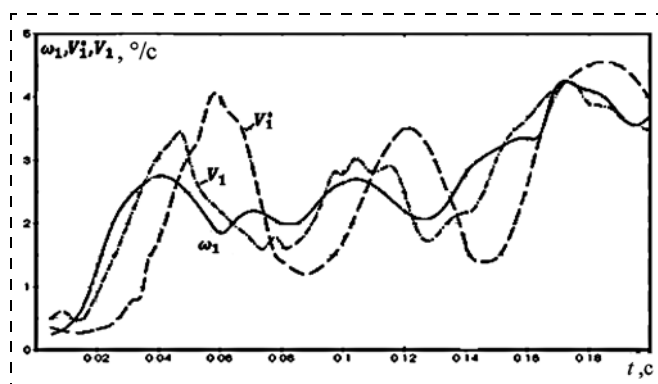


Рис. 3. Графики угловой скорости ω_1 и ее оценок

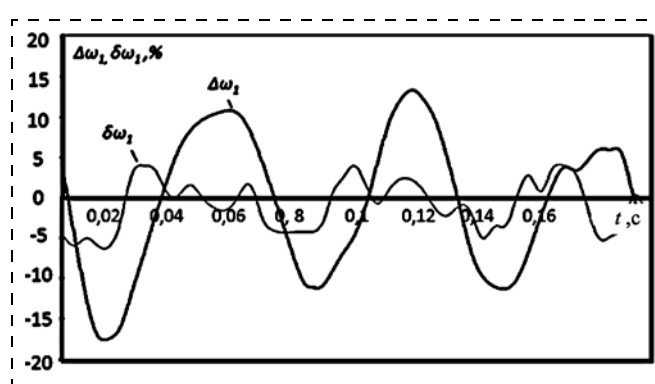


Рис. 6. Графики погрешностей определения ω_1

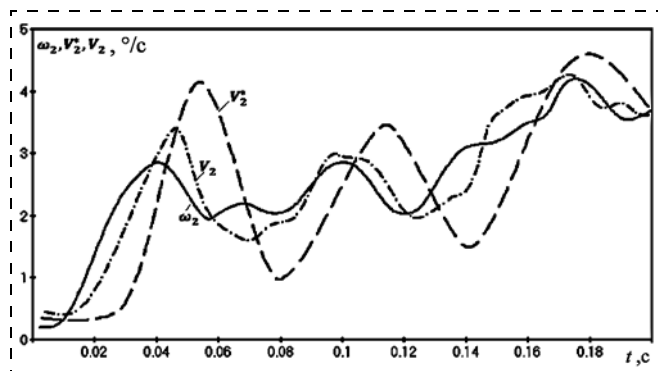


Рис. 4. Графики угловой скорости ω_2 и ее оценок

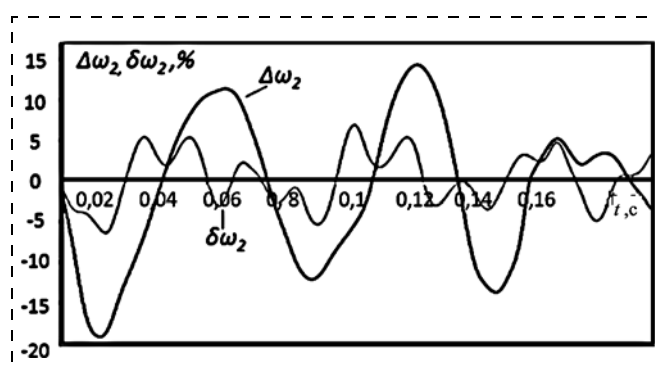


Рис. 7. Графики погрешностей определения ω_2

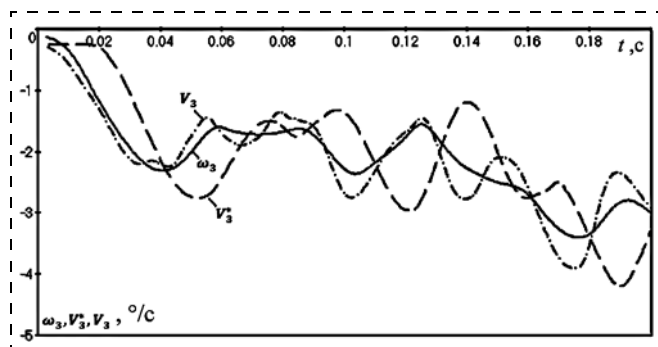


Рис. 5. Графики угловой скорости ω_3 и ее оценок

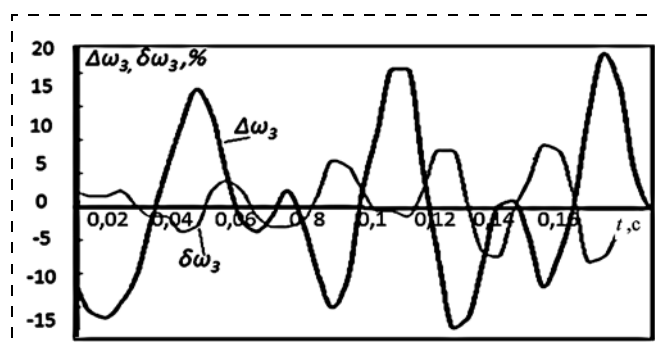


Рис. 8. Графики погрешностей определения ω_3

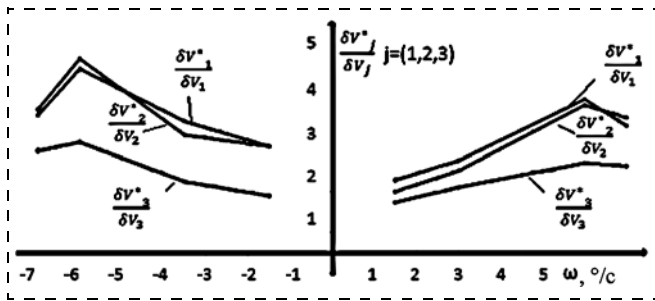


Рис. 9. Отношения погрешностей до и после компенсации

Для данной реализации угловой скорости вращения платформы $\omega_j = \langle \omega_j \rangle + \omega'_j$; ($j = 1, 2, 3$), где $\langle \omega_1 \rangle = \langle \omega_2 \rangle \approx 4,5^\circ/\text{с}$, $\langle \omega_3 \rangle \approx -3,8^\circ/\text{с}$; ω'_j — случайные составляющие амплитудой до $0,8^\circ/\text{с}$ и частотой до 15 Гц, суммарные погрешности блока ГИУС без компенсации погрешностей составили

$$\delta V_1^* = 36 \%, \delta V_2^* = 33,8 \%, \delta V_3^* = 21,8 \%,$$

а после компенсации — 17,2 %, 13,7 % и 12 % соответственно, т. е. погрешности снижены по интегральным оценкам в 2,1; 2,47 и 1,82 раза. Подобные отношения вычисляли и при других угловых скоростях вращения платформы. На рис. 9 представлены графики изменения отношений погрешностей δV_j^* и δV_j в зависимости от угловой скорости. Видно, что при ω_j от 1 до $7^\circ/\text{с}$ суммарные погрешности снижены от 1,3 до 4,2 раз.

Заключение

1. С помощью моделирования работы блока ГИУС проведена оценка их методических погрешностей и возможной точности компенсации этих погрешностей алгоритмическим способом.

Методические погрешности ГИУС при измерении угловых скоростей составляют 1,93 %. Время

переходных процессов в ГИУС достигает 0,06 с, перегулирование 43 %. При измерении угловой скорости по гармоническому закону с частотой 2,5 Гц приведенная относительная погрешность определения ее мгновенных значений достигает 3,35 %.

При точном задании параметров блока гироскопов, точном съеме их выходных сигналов и вычислении производных углов относительных движений применение полного алгоритма теоретически позволяет снизить погрешности определения мгновенных значений переменной угловой скорости до $0,58 \cdot 10^{-4} \%$.

2. Экспериментальные результаты по компенсации погрешностей блока ГИУС показывают, что с помощью алгоритма (3), (6) можно снизить погрешности определения среднего значения компонент вектора угловой скорости примерно на порядок по множеству реализаций. При этом дисперсии вычисленных значений угловых скоростей по отношению к дисперсиям показаний ГИУС практически не возрастают. При определении мгновенных значений трех компонент вектора угловой скорости платформы, являющихся реализациями стационарных случайных процессов с математическими ожиданиями $1...7^\circ/\text{с}$, случайными составляющими с амплитудой до $0,8^\circ/\text{с}$ и частотой до 15 Гц, суммарные погрешности блока ГИУС были снижены в 1,3...4,2 раза.

Список литературы

1. Плотников П. К. К вопросу построения алгоритмов оценивания параметров движения по сигналам датчиков первичной информации // Изв. РАН. МТТ. 1990. № 1. С. 12—22.
2. Аleshкин В. В., Плотников П. К., Челноков Ю. Н. Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 60—65.
3. Бендат Дж., Пирсон А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
4. Зайдель А. И. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. 96 с.

Experimental Confirmation of Reduction of Unit GEUS Errors Due to an Algorithmic Compensation

V. V. Aleshkin, aleshkinvv@ya.ru✉, P. K. Plotnikov, pribor@sstu.ru,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, 410052, Russian Federation

Corresponding author: Aleshkin Valery V., D. Sc., Professor,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin,
Saratov, 410052, Russian Federation, e-mail: aleshkinvv@ya.ru

Received on December 26, 2014

Accepted on February 12, 2015

Efficiency of the asymptotic approach to the problem of determination of the components of the vector of absolute angular velocity of an object by the data from a twofold unit of three gyroscopes was experimentally confirmed. Cinematic diagram of the gyroscopic block, algebraic algorithms, methods and results of the experiments were provided. At the first stage six measurement channels were calibrated, at the second stage the measurement accuracy of the constant components of the angular velocities within the range of $1...7 \text{ deg/s}$ was evaluated. At the third stage the effectiveness of the error compensation block in the dynamic mode was investigated experimentally. The components of the angular velocity presented realization of the stationary random

processes with a constant of 1...6 deg/s, random components with amplitudes up to 0,8 deg/s and frequency of 15 Hz. Therefore, methods of correlation analysis of the random processes were applied for the analysis of the experimental data. Application of the algorithms based on simplified equations of the inverse task for a block of three gyro angular velocity meters, allows us to significantly reduce the dc component and instantaneous values of the errors in estimation of the parameters of an object's motion.

Keywords: sensor block, methodological errors, algorithmic compensation, simplified algorithms, results of experiments

For citation:

Aleshkin V. V., Plotnikov P. K. Experimental Confirmation of Reduction of Unit GEUS Errors Due to an Algorithmic Compensation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 637—642.

DOI: 10.17587/mau.16.637-642

References

1. Plotnikov P. K. *K voprosu postroeniya algoritmov otsenivaniya parametrov dvizheniya po signalam datchikov pervichnoi informatsii* (On the constructing estimation algorithms of motion parameters using

primary information sensor signals), *Izv. RAN. MTT*, 1990, no. 1, pp. 12—22.

2. Aleshkin V. V., Plotnikov P. K., Chelnokov Yu. N. *Opreделение konfiguratsii bloka datchikov pri asimptoticheskom otsenivani parametrov dvizheniya* (Defining the configuration of the sensor unit under asymptotic estimation of motion parameters), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 2, pp. 60—65.

3. Bendat J., Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov* (Measurement and analysis of random processes), Moscow, Mir, 1971, 408 p.

4. Zaydel A. I. *Elementarnye otsenki oshibok izmerenii* (Elementary estimations of measurement errors), Leningrad, Nauka, 1968, 96 p.

УДК 629.73.533.6

DOI: 10.17587/mau.16.642-647

Е. С. Чувашева, ст. преподаватель, chuvashevalena@gmail.com,

С. Н. Чувашев, д-р физ.-мат. наук, проф., snchuv@mail.ru,

МАГИ имени К. Э. Циолковского

Об эффективности применения изобарических режимов на гиперзвуковых летательных аппаратах

С помощью разработанной комплексной модели высокоскоростных летательных аппаратов исследуется эффективность применения системы снижения аэродинамического сопротивления на основе активного воздействия на гиперзвуковой поток путем инъекции легкого газа в изобарическом режиме. Сравнение с аппаратом, в котором соответствующее аэродинамическое сопротивление компенсируется двигателем, показало, что применение указанной системы может существенно (примерно вдвое) снизить стартовую массу аппарата.

Ключевые слова: высокоскоростные летательные аппараты, аэродинамическое сопротивление, активное воздействие, изобарический режим, комплексные модели

Введение

К настоящему времени традиционные подходы к улучшению аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов различного назначения, основанные на оптимизации формы поверхности летательного аппарата (ЛА), в значительной степени исчерпаны. Вместе с тем, необходимость радикального повышения летных качеств летательных аппаратов, в частности, снижения аэродинамического сопротивления, ощущается весьма остро. Для гиперзвуковых ЛА (ГЛА) существенным также является ограничение нагрева поверхности.

Для снижения волнового сопротивления можно было бы уменьшать до очень малых значений углы наклона поверхностей ЛА относительно направления потока, но при заданном полезном объеме ЛА это привело бы к быстрому нарастанию сил трения. Оптимальные с точки зрения минимизации суммы волнового сопротивления и сил трения формы соответствуют значительным углам наклона поверх-

ностей ЛА, соответствующим многократному росту давления на поверхности относительно давления среды p_∞ . Но и эти оптимизированные с силовой точки зрения формы часто не делают из-за больших тепловых потоков на окрестности критических точек: для ограничения мощности нагрева острые вершины и кромки часто затупляют. Это приводит, однако, к росту волнового сопротивления.

Надежды на решение указанных проблем в значительной мере связаны с активным воздействием на аэродинамику путем инъекции массы и/или энергии. Критически важным для применения методов активного воздействия является такой выигрыш по сравнению с классическим методом снижения лобового сопротивления (применением заостренной формы носовой части), который превышает соответствующие энергозатраты на организацию активного воздействия: тогда можно говорить об общем энергетическом выигрыше от активного воздействия.

В работах [1—13] предложена концепция системы снижения лобового сопротивления ГЛА за счет