

УДК 621.3.049; 621.3.084.2

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ УГЛОВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

Цветков Г.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Разработана автоматизированная измерительная система с использованием приборов и средств инерциальной навигации, позволяющая повысить точность измерения углового рассогласования установочных площадок под приборы научной аппаратуры. Расширение функциональных возможностей достигается за счет дополнительного измерения угла азимутального рассогласования. (E-mail: zvetkov71043@mail.ru)

Ключевые слова: измерительные навигационные головки, акселерометр, угловые отклонения от горизонта, угловые отклонения по азимуту

Введение

Автоматизированная измерительная система предназначена для измерения углов взаимной ориентации установочных площадок под приборы научной аппаратуры летательных аппаратов. Известна система для измерения наклона [1], состоящая из двух идентичных измерительных каналов. Измерительный канал имеет измерительный преобразователь и систему преобразования выходных сигналов. Измерительные преобразователи устанавливаются на контролируемом объекте, продольные оси преобразователей располагаются взаимноперпендикулярно. Измерение взаимной ориентации установочных площадок относительно плоскости горизонта производится следующим образом: на первой площадке устанавливаются измерительные преобразователи, измеряются углы отклонения от горизонта относительно двух взаимноперпендикулярных осей, затем измерительные преобразователи устанавливаются на вторую площадку и повторяются измерения отклонения площадки от горизонта. По результатам измерений находятся углы рассогласования контролируемых площадок относительно горизонта.

Недостатком устройства является то, что при больших углах азимутального рассогласования между базовыми осями координат контролируемых площадок и при колебаниях основания возникает динамическая погрешность, снижающая точность измерений.

Кроме устройства [1] известны оптико-электронные устройства для измерения пространственных угловых координат [2]. Недостатки оптико-электронных устройств: малый диапазон измеряемых углов ± 20 уг. мин, большое рабочее расстояние 3–6 м, что затрудняет контроль площадок, расположенных в труднодоступных местах объекта.

Цель работы – повышение точности измерения углового рассогласования и расширения функциональных возможностей дополнительным измерением угла азимутального рассогласования.

Сущность технического решения поясняется чертежами. На рисунке 1 приведена схема системы для измерения пространственных угловых отклонений, на рисунке 2 – расположение систем координат:

$X_r Y_r Z_r$ – связанная с изделием,

$X_1 O Y_1 Z_1$ – связанная с базовыми осями первой контролируемой площадки,

$X_2 O Y_2 Z_2$ – связанная с базовыми осями второй контролируемой площадки,

$\xi_1 O \zeta_1 \eta_1$ – связанная с измерительным преобразователем 1-й измерительной головки (ИГ-1),

$\xi_2 O \zeta_2 \eta_2$ – связанная с измерительным преобразователем 2-й измерительной головки (ИГ-2).

В качестве измерительных преобразователей могут быть использованы прецизионные акселерометры, например, струнный акселерометр или акселерометр по авторскому свидетельству [3, 4].

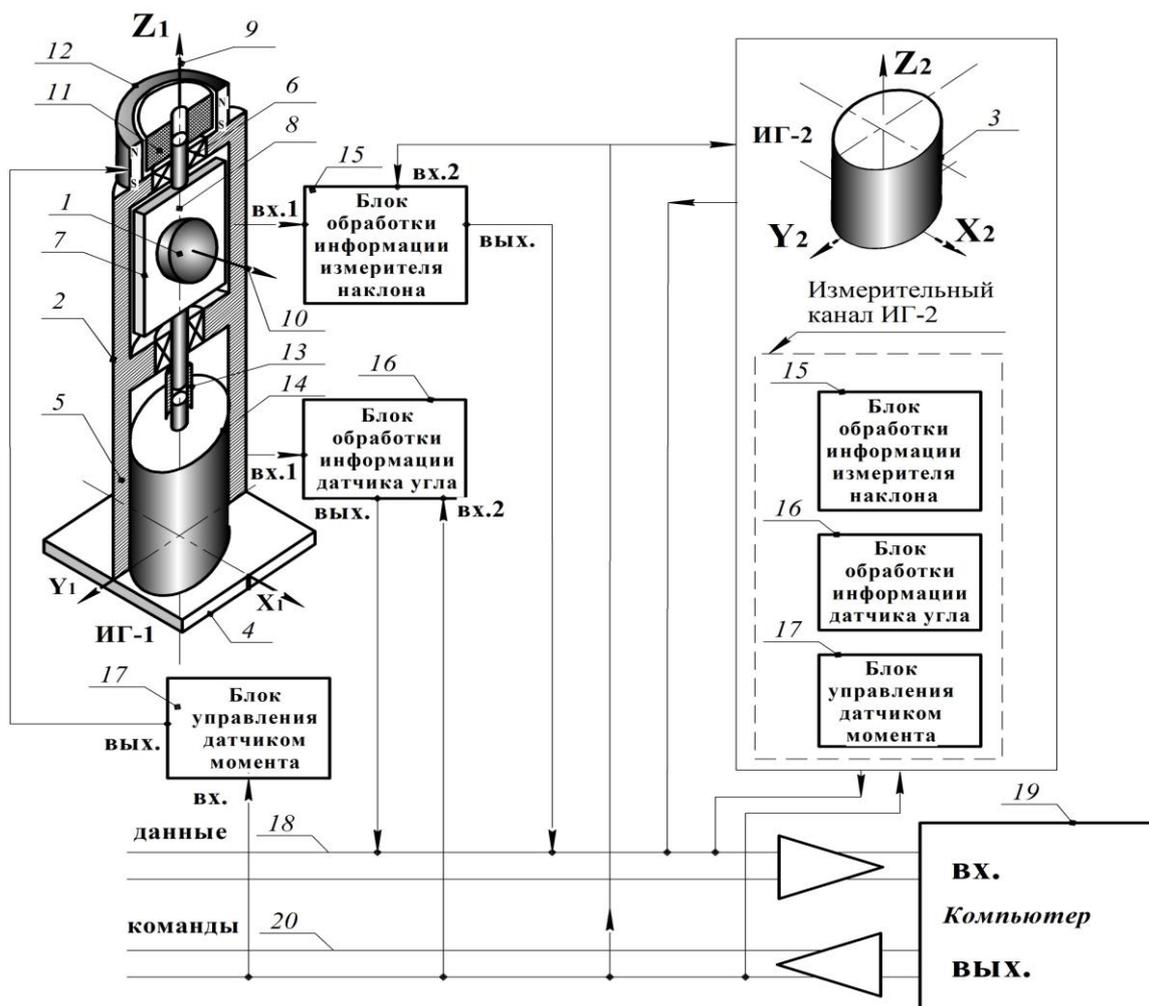


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема измерительной системы

Система для измерения пространственных угловых отклонений, приведенная на рисунке 1, состоит из двух идентичных измерительных головок 2, 3 (ИГ-1 и ИГ-2) и двух идентичных измерительных каналов. Каждая измерительная головка содержит основание 4, корпус 5; с корпусом через подшипники 6 кинематически связана рамка 7, ось которой направлена вдоль оси OZ_i ; в рамке 7 закреплен измерительный преобразователь 1, ось чувствительности которого расположена в горизонтальной плоскости; на цапфе рамки 7 закреплен ротор датчика момента (ДМ) 11; статор датчика момента 12 закреплен на корпусе 5 ИГ-2; вторая цапфа рамки 7 через муфту 13 кинематически связана с осью датчика угла (ДУ) 14. Каждый измерительный канал содержит блок обработки информации измерителя наклона 15, блок обработки информации ДУ 16 и блок управления ДМ 17. Оба канала через шину данных 18 связаны с входом персонального

компьютера 19, а через шину команд 20 – с выходом компьютера 19. Электрически связаны: выход измерительного преобразователя 1 – с первым входом блока обработки информации датчика наклона 15; выход блока обработки информации измерителя наклона через шину данных – с входом компьютера 19; второй вход блока обработки информации измерителя наклона 15 через шину команд – с выходом компьютера 19; выход ДУ – с первым входом блока обработки информации датчика угла 16.

Электрически связаны: выход блока обработки информации ДУ 14 через шину данных 18 – с входом компьютера 19; второй вход блока обработки информации ДУ 14 через шину команд 20 – с выходом компьютера 19; вход блока управления ДМ 17 через шину команд 20 – с выходом компьютера 19; выход блока управления ДМ – с ротором датчика момента 11.

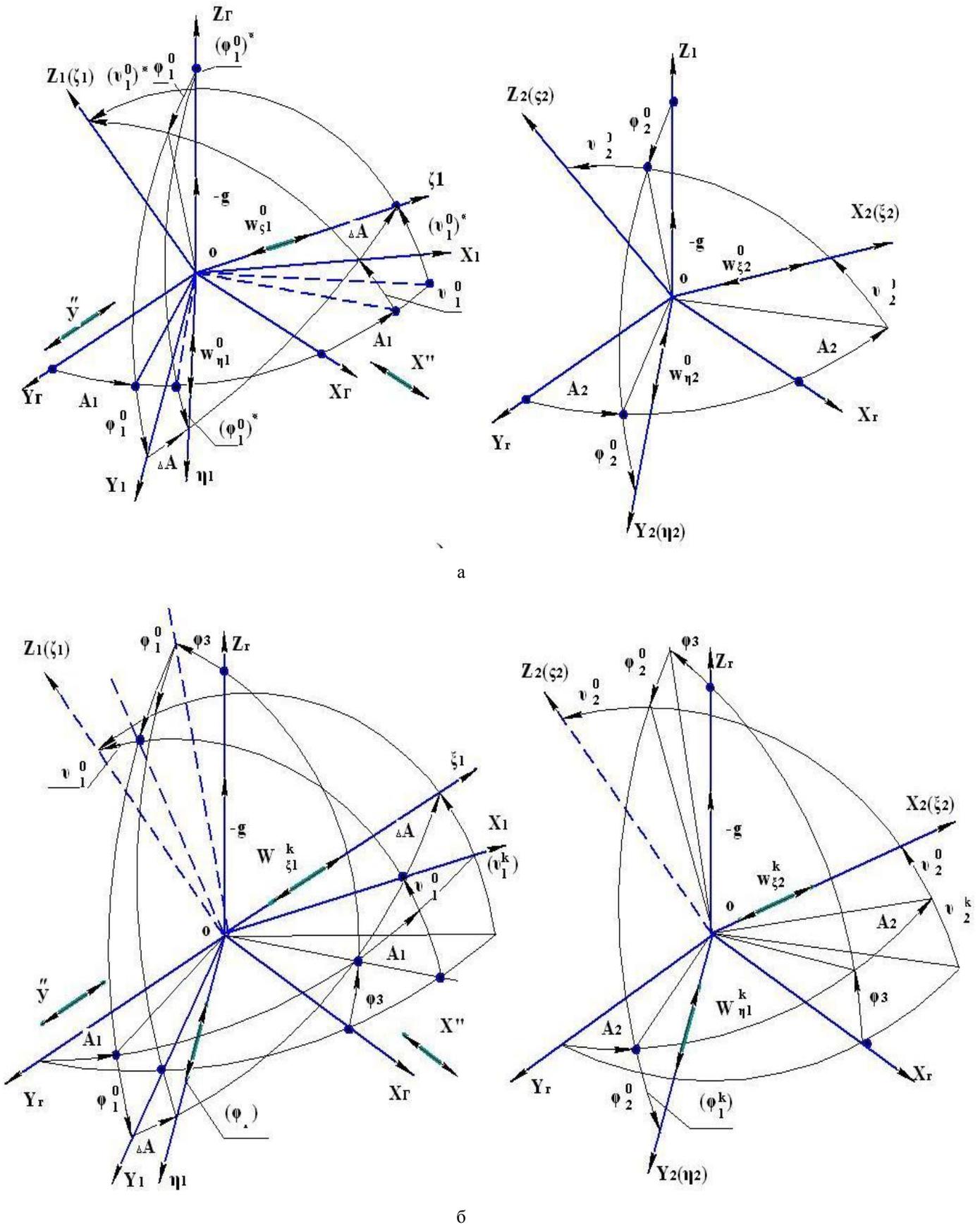


Рисунок 2 – Системы координат

Процедура функционирования измерительной системы

Система работает следующим образом. Измерительные головки ИГ-1 и ИГ-2 устанавливаются на контролируемые площадки объекта, причем реперные точки, нанесенные на основания I, совмещаются для ИГ-1 с осью X_1 первой площадки, а для ИГ-2 – с осью X_2 второй площадки. Из требований чертежа определяется номинальный угол азимутального рассогласования A_1 , значение которого заносится в память компьютера 13. С выхода компьютера 19 через шину команд 20 на вход блока управления ДМ 17 ИГ-1 поступает команда «Старт»; при этом с выхода блока управления ДМ на обмотку ротора датчика момента 11 подается управляющее напряжение, рамка 7 начинает вращаться вокруг оси OZ_1 . Одновременно с командой «Старт», поданной на вход блока управления ДМ 17, на второй вход блока обработки информации ДУ 16 ИГ-1 поступает команда «Старт»; при этом блок обработки информации ДУ 16 начинает отсчет угла поворота рамки 7, с выхода блока обработки информации ДУ 16 через шину данных 18 информация о величине угла поворота поступает на вход компьютера 19, в компьютере величина измеренного угла поворота сравнивается с величиной номинального угла азимутального рассогласования ΔA . Когда значение измеренного угла поворота станет равным ΔA , с выхода компьютера через шину команд 20 на вход блока управления ДМ 17 измерительной головки ИГ-1 и второй вход блока обработки информации ДУ 14 подается команда «Стоп»; при этом движения рамки 7 прекращаются, а с выхода блока обработки информации ДУ 14 через шину данных 18 на вход компьютера 19 поступает информация об измерительном угле разворота рамки 7 ΔA . С выхода компьютера 19 через шину команд 20 на вторые входы блоков обработки информации измерителя наклона 15 подается одновременно команда «Старт»; при этом с выхода блоков обработки информации измерителя наклона 15 измерительных головок ИГ-1 и ИГ-2 через шину данных 18 поступает на вход компьютера 19 информация об углах отклонения контролируемых площадок $(\varphi_1^0)^*$ и φ_2^0 . С выхода компьютера через шину команд 20 на вторые входы блоков обработки информации измерителя наклона 15 подается команда «Стоп». Измерение углов отклонения прекращается. Значения $(\varphi_1^0)^*$ и φ_2^0 записываются в

память компьютера 19. В память компьютера заносится информация об угле поворота рамки 7: для ИГ-1 $\Psi_{max1} = \Delta A + 90^0$, для ИГ-2 $\Psi_{max2} = 90^0$. С выхода компьютера 19 через шину команд 20 одновременно подается команда «Старт» на вход блока управления ДМ 17 и второй вход блока обработки информации ДУ 16; с выхода блока управления ДМ 16 управляющее напряжение подается на ротор 11 датчика момента 17; с выхода блока обработки информации ДУ 16 через шину данных 18 информация об угле разворота рамки 7 поступает на вход компьютера 19. В компьютере 19 происходит сравнение измеренного угла поворота рамки 7 Ψ с $\Psi_{max1} = \Delta A^* + 90^0$, когда $\Psi = \Psi_{max2}$, с выхода компьютера 19 через шину команд 20 подается команда «Стоп» на вход блока управления ДМ 17 и на второй вход блока обработки информации ДУ 16; вращение рамки 7 прекращается; с выхода блока обработки информации ДУ 16 через шину данных 18 информация об угле поворота рамки 7 поступает на вход компьютера 19. Разворот рамки 7 ИГ-2 на угол $\Psi_2 = -90^0$ производится аналогично. С выхода персонального компьютера 19 через шину команд 18 на второй вход блока обработки информации измерителя наклона канала измерения ИГ-1 и на второй вход блока обработки информации измерителя наклона канала измерения ИГ-2 подается одновременно команда «Старт». Производится измерение углов отклонения от горизонта $(\varphi_1^0)^*$ и φ_2^0 , информация о которых с выходов блоков обработки информации датчиков наклона 15 через шину данных 18 подается на вход компьютера 19. С выхода компьютера 19 через шину команд 18 на входы блоков обработки информации измерителя наклона 15 измерительных каналов ИГ-1 и ИГ-2 подается команда «Стоп»; в память компьютера 19 записываются величины $(\varphi_1^0)^*$ и φ_2^0 . В компьютер 19 вводятся величины $\Psi_{1min} = \Delta A$, $\Psi_{2min} = 0$. Измерители наклона приводятся в первоначальное положение по схеме работы, приведенной выше. Объект с установочными площадками наклоняется вокруг горизонтальной оси на угол наклона и $\varphi_3 = 5^0$. Углы отклонения площадок $(\varphi_1^k)^*$, φ_2^k , $(\vartheta_1^k)^*$, ϑ_2^k определяются по схеме работы, изложенной выше. По программе расчета, заложенной в компьютере 19, с учетом величин $(\varphi_1^0)^*$, φ_2^0 , $(\vartheta_1^0)^*$, ϑ_2^0 , $(\varphi_1^k)^*$, φ_2^k , $(\vartheta_1^k)^*$, ϑ_2^k , ΔA , определяются углы рассогласования контроли-

руемых площадок относительно горизонтальной плоскости $\Delta\varphi$, $\Delta\vartheta$ и угол азимутального рассогласования $A = \Delta A^* + \delta\bar{A}$.

Анализ работы измерительной системы

Для анализа работы системы и оценки точностных характеристик при низкочастотных колебаниях основания воспользуемся рисунком 2. На рисунке 2а показано расположение систем координат: $X_r O Y_r Z_r$ – связанной с изделием; $X_l O Y_l Z_l$ и $X_2 O Y_2 Z_2$ – связанные с контролируемыми площадками; $\xi_1 0 \eta_1 \lambda_1$ и $\xi_2 0 \eta_2 \lambda_2$ – связанные с измерительными преобразователями, при горизонтальном расположении осей изделия $O X_r$ и $O Y_r$. На рисунке 2б приведено расположение систем координат при наклоне изделия вокруг оси $O Y_r$ на угол φ_3 . На рисунке 2а: A , φ_1^0 , ϑ_1^0 – угловые отклонения системы координат $X_l O Y_l Z_l$ относительно системы координат $X_r O Y_r Z_r$; φ_2^0 , ϑ_2^0 , A_2 – угловые отклонения системы координат $X_2 O Y_2 Z_2$ относительно системы координат $X_r O Y_r Z_r$; $(\varphi_1^0)^*$, $(\vartheta_1^0)^*$ – угловые отклонения системы координат $\xi_1 0 \eta_1 \lambda_1$ относительно системы координат $X_r O Y_r Z_r$; ΔA – угол разворота оси чувствительности измерительного преобразователя головки ИГ-1 в плоскости $X_l O Y_l$. Считая, что ускорение силы тяжести \bar{g} направлено в отрицательном направлении оси $O Z_r$, основание не совершает колебаний, определим ускорения, которые измеряются преобразователями измерительных головок ИГ-1 и ИГ-2 при расположении их вдоль осей; $0\eta_1$, $0\xi_1$, $0\eta_2$, $0\xi_2$.

Тогда: для ИГ-1:

$$\begin{aligned} W_{\eta_1}^0 &= g \sin(\varphi_1^0)^*, \\ W_{\xi_1}^0 &= -g \cos(\varphi_1^0)^* \sin(\vartheta_1^0)^*; \end{aligned} \quad (1)$$

для ИГ-2:

$$\begin{aligned} W_{\eta_2}^0 &= g \sin \vartheta_2^0, \\ W_{\xi_2}^0 &= -g \cos \vartheta_2^0 \sin \vartheta_1^0; \end{aligned} \quad (2)$$

При отклонении изделия от оси $O Y_r$ на угол φ_3 , проекции ускорения на оси систем координат $\xi_1 0 \eta_1 \lambda_1$ и $\xi_2 0 \eta_2 \lambda_2$ запишутся в виде:

$$W_{\eta_1}^k = -g \begin{bmatrix} -\cos \varphi_3 \sin(\varphi_1^0)^* + \sin \varphi_3 \times \\ \times \sin(A_1 + \Delta A) \cos(\varphi_1^0)^* \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$W_{\eta_2}^k = -g \begin{bmatrix} -\cos \varphi_3 \sin \varphi_2^0 + \sin \varphi_3 \times \\ \times \cos \varphi_2^0 \sin A_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$W_{\xi_1}^k = -g \begin{bmatrix} \sin \varphi_3 \cos(A_1 + \Delta A) + \cos \varphi_3 \times \\ \times \cos(\varphi_1^0)^* \sin(\vartheta_1^0)^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$W_{\xi_2}^k = -g \begin{bmatrix} \sin \varphi_3 \cos A_2 \cos \vartheta_2^0 + \cos \varphi_3 \times \\ \times \cos \varphi_2^0 \sin \vartheta_2^0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Величины $W_{\eta_1}^k$, $W_{\eta_2}^k$, $W_{\xi_1}^k$, $W_{\xi_2}^k$ могут быть представлены в виде:

$$W_{\eta_1}^k = g \sin(\varphi_1^k)^*, \quad (7)$$

$$W_{\xi_1}^k = -g \sin(\vartheta_1^k)^*,$$

$$W_{\eta_2}^k = g \sin \varphi_2^k,$$

$$W_{\xi_2}^k = -g \sin \vartheta_2^k, \quad (8)$$

С учетом малости φ_3 , а также выражений (7), (8) из уравнений (3)–(6) получим:

$$\operatorname{tg}(A + \Delta A) = \frac{\sin \frac{(\varphi_1^k)^* - (\varphi_1^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_1^k)^* - (\vartheta_1^0)^*}{2}}, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} A_2 = \frac{\sin \frac{(\varphi_2^k)^* - (\varphi_2^0)^*}{2}}{\sin \frac{(\vartheta_2^k)^* - (\vartheta_2^0)^*}{2}}, \quad (10)$$

Таким образом, разработанная измерительная система позволяет при наклоне изделия относительно горизонта определить угол азимутального рассогласования между базовыми осями двух контролируемых площадок. Углы отклонения от горизонта определяются из соотношений:

$$(\varphi_1^0)^* = \frac{W_{\eta_1}^0}{g}, (\vartheta_1^0)^* = \frac{W_{\xi_1}^0}{g}, \quad (11)$$

$$\varphi_2^0 = \frac{W_{\eta^2}^0}{g}, \vartheta_2^0 = \frac{W_{\xi^2}^0}{g}, \quad (12)$$

Заключение

Выявлены закономерности, позволяющие обоснованно подходить к проектированию измерительных систем контроля пространственных угловых отклонений установочных площадок под приборы управления, научную аппаратуру.

Разработанная измерительная система позволяет при наклоне изделия относительно горизонта определить угол азимутального рассо-

гласования между базовыми осями двух контролируемых площадок.

Список использованных источников

1. Система для измерения наклона. Патент 4378693 США Заявл. 11.02.81 г. № 233645. Оpubл. 05.04.83. МКИ G 01 B 5/28.
2. Высокоточные угловые измерения / под. ред. Ю.Г. Якушенкова). – М. : Машиностроение, 1987.
3. Авторское свидетельство СССР № 517787. МКИ C01 G 9/02.
4. Треугольной наклономер. Авторское свидетельство СССР № 297159 от 01.09.90 г. / Г.А. Цветков, М.Г. Каган.

Zvetkov G.A.

Automated metering system for control of the spatial-angular deviations

Automatic metering system using devices and instruments for inertial navigation has been elaborated. The system allows more accurate measurement of angular deviation of installation sites for scientific equipment. Enhanced functionality is achieved by additional measuring of the azimuth angle error.

(E-mail: zvetkov71043@mail.ru)

Key words: navigation measuring heads, accelerometer, horizon angular deviation, azimuth angular error

Поступила в редакцию 23.10.2012.