

УДК 681.5:629.733.5

С.Н. ФИРСОВ, ДО КУОК ТУАН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОБЕСЕЧЕНИЕ ГЛУБОКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ПРИ ПЛОСКОСТНОМ ДВИЖЕНИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Отражена проблематика диагностического обеспечения блока акселерометров, позволяющего диагностировать его техническое состояние с глубиной до вида отказа с последующем восстановлением работоспособности отказавшего измерителя в режиме реального времени. В результате исследования различных вариантов компоновки измерителей для задач одноосного и плоскостного движения малогабаритного летательного аппарата, были получены критерии, выполнение которых обеспечивает глубокое диагностирование блока акселерометров без применения дополнительной информации от других измерительных блоков системы управления и при наличии минимальной аппаратной избыточности.

Ключевые слова: отказостойкость, диагностирование, акселерометр, отказ, матрица связи, ускорение, угловая скорость.

Введение

Исследования в области развития бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) малогабаритными летательными аппаратами (МЛА) направлены помимо решения задачи повышения их точности на обеспечение высокого уровня их надежности [1]. Эту задачу часто решают применением избыточных измерителей параметров движения – линейного ускорения и угловой скорости объекта, при этом пропорционально кратности резервирования увеличиваются массогабаритные и энергетические показатели, что в свою очередь приводит к уменьшению полезной нагрузке МЛА и повышению стоимостных показателей комплекса [1]. Исключает подобные недостатки системный подход к обеспечению отказостойкости, заключающийся в глубоком диагностировании технического состояния системы управления МЛА и гибком ее восстановлении в режиме реального времени имеющимися в наличии избыточностями, которые заложены в систему в процессе ее проектирования или вводятся искусственно.

Для обеспечения отказостойкостью системы управления необходимо обеспечить отказостойкостью элементы системы управления МЛА, к числу которых относятся и измерители параметров движения – акселерометры.

Типовая схема размещения измерителей состоит из трех акселерометров, оси чувствительности которых ортогональны друг другу и совпадают (или параллельны) с осями связанной с МЛА системой координат. Такое построение измерительного блока является наиболее простым с точки зрения обработ-

ки информации, но недостаток его заключается в том, что отсутствует возможность решения даже первостепенной задачи диагностического обеспечения – определения момента времени возникновения отказа, поэтому является актуальным проектирование таких измерительных блоков, в которых количество ЧЭ и их компоновка позволят решать основные задачи, возложенные на измерители, а также диагностировать техническое состояние с глубиной до вида отказа – определение причины, повлекшей за собой возникновение отказа БИНС [2].

Постановка задачи

Для выполнения условия полной диагностируемости измерительного блока необходимо обеспечение структурной и сигнальной диагностируемости устройства при решении каждой задачи диагностируемости. Обеспечение выполнения критерия сигнальной диагностируемости достигается путем формирования соответствующих входных сигналов, обеспечивающих выполнение соответствующего критерия. Выполнение критерия сигнальной диагностируемости является достаточным условием диагностируемости. Для обеспечения необходимого условия диагностируемости необходимо выполнение критерия структурной диагностируемости измерительного блока – если система структурно не диагностируема при решении соответствующей задачи диагностического обеспечения, то она также сигнально не диагностируема, а соответственно не выполняются условия полной диагностируемости. Таким образом, задача обеспечения структурной диагностируемости измерительного блока являет-

ся первостепенной и необходимой при разработке диагностического обеспечения [3].

Так как акселерометры принадлежат к объектам диагностирования с неизвестным входом, то единственным путем обеспечения выполнения критерия структурной диагностируемости является введение структурной избыточности. Как уже отмечалось, одним из примеров введения структурной избыточности является мажоритарная схема включения акселерометров – по три акселерометра по каждой оси связанной с МЛА системой координат. Но, несмотря на то, что указанная схема обеспечивает полную диагностируемость акселерометров с глубиной до вида отказа, введение чрезмерного количества ЧЭ приводит к увеличению массы, габаритов и энергопотребления системы. Подобное ограничение определяет актуальность решения следующих задач:

1. Минимально необходимое количество измерителей, позволяющих решать задачу глубокого диагностирования с последующим восстановлением отказавшего измерителя в режиме реального времени.
2. Необходимо сформировать условия компоновки измерителей в блоке, позволяющие решать задачу глубокого диагностирования с последующим восстановлением отказавшего измерителя в режиме реального времени.
3. Формирование ограничений на расположение измерителей относительно начала координат измерительного базиса.

Для формирования указанных критериев рассмотрим движения МЛА для случаев одноосного, плоскостного и пространственного движений.

1. Одноосное движение МЛА

В качестве примера рассмотрим движение МЛА относительно одной оси, например ОХ (рис. 1).

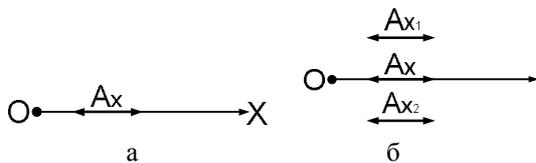


Рис. 1. Расположение акселерометра

Математическая модель номинального функционирования акселерометра, без учета его инерциальных свойств, имеет вид: $U_{Ax}(t) = k_{Ax} A_x(t)$, где $U_{Ax}(t)$ – выходное напряжение акселерометра, пропорциональное проекции линейного ускорения на ось чувствительности; k_{Ax} – коэффициент передачи акселерометра.

При одноосном движении для определения значения ускорения такая компоновка является достаточной. Но она не позволяет решать задачу обеспечения отказостойкостью: диагностировать техническое состояние акселерометра с глубиной до вида отказа и по результатам диагностирования гибко восстанавливать его измерения.

печения отказостойкостью: диагностировать техническое состояние акселерометра с глубиной до вида отказа и по результатам диагностирования гибко восстанавливать его измерения.

Применим для решения задачи полной диагностируемости мажоритарную схему (рис. 1, б).

Для мажоритарной схемы математическая модель примет вид:

$$U_{Ax}(t) = k_{Ax} A_x(t); U_{Ax_1}(t) = k_{Ax_1} A_{x_1}(t);$$

$$U_{Ax_2}(t) = k_{Ax_2} A_{x_2}(t),$$

где $U_{Ax_1}(t)$, $U_{Ax_2}(t)$ – выходные напряжения акселерометров $A_{x_1}(t)$ и $A_{x_2}(t)$, соответственно, пропорциональные проекции линейного ускорения на оси чувствительности; k_{Ax_1} , k_{Ax_2} – коэффициенты передачи акселерометров $A_{x_1}(t)$ и $A_{x_2}(t)$.

Математическое описание возмущенного поведения акселерометров, с учетом параметризации видов отказов, будет иметь вид:

$$\begin{cases} \tilde{U}_{Ax}(t) = \tilde{k}_{Ax} A_x(t) + \tilde{U}_{Ax_0}(t); \\ \tilde{U}_{Ax_1}(t) = \tilde{k}_{Ax_1} A_{x_1}(t) + \tilde{U}_{Ax_{10}}(t); \\ \tilde{U}_{Ax_2}(t) = \tilde{k}_{Ax_2} A_{x_2}(t) + \tilde{U}_{Ax_{20}}(t); \end{cases} \quad (1)$$

где $\tilde{U}_{Ax}(t)$, $\tilde{U}_{Ax_1}(t)$, $\tilde{U}_{Ax_2}(t)$ – выходные напряжения акселерометров при наличии отказов; $\tilde{k}_{Ax} = k_{Ax} + \Delta k_{Ax}$, $\tilde{k}_{Ax_1} = k_{Ax_1} + \Delta k_{Ax_1}$, $\tilde{k}_{Ax_2} = k_{Ax_2} + \Delta k_{Ax_2}$ – возмущенные коэффициенты передачи акселерометров; Δk_{Ax} , Δk_{Ax_1} , Δk_{Ax_2} – отклонение коэффициентов передачи от номинальных значений; $\tilde{U}_{Ax}(t)$, $\tilde{U}_{Ax_1}(t)$, $\tilde{U}_{Ax_2}(t)$ – дрейфы акселерометров.

Мажоритарная схема включения акселерометров при применении к ней сигнально-параметрического подхода обеспечивает полную диагностируемость датчиков с глубиной до вида отказа, но введение большого количества измерителей приводит к увеличению массы, габаритов и энергопотребления системы.

2. Плоскостное движение МЛА без учета влияния угловой скорости

Рассмотрим движение объекта на плоскости. Для измерений абсолютного значения ускорения минимально необходимое количество акселерометров равняется двум. Расположим эти акселерометры произвольным образом (рис. 2, а).

Уравнения связи между полученными измерениями $\tilde{U}_{A_x}(t)$, $\tilde{U}_{A_{x_1}}(t)$ и измеряемым ускорением $\bar{a} = [a_x \ a_y]^T$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_{A_x}(t) \\ \tilde{U}_{A_{x_1}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{k}_{A_x} & 0 \\ 0 & \tilde{k}_{A_{x_1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \tilde{U}_{A_{x_0}}(t) \\ \Delta \tilde{U}_{A_{x_{10}}}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

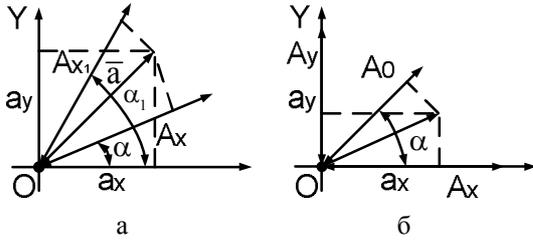


Рис. 2. Компонровка измерителей при движении МЛА в плоскости

Анализ системы уравнений (2) показывает, что они линейно зависимы друг относительно друга, независимо от значения углов α и α_1 , поэтому для обеспечения диагностируемости блока акселерометров с заданной глубиной необходимо вводить дополнительные измерители, т.е. вводить аппаратную избыточность. Для начала введем еще один (избыточный) акселерометр (рис. 2, б).

Для представленной компоновки измерителей математическую модель номинального поведения представим в следующем виде:

$$U_{A_x}(t) = k_{A_x} a_x(t); \quad U_{A_y}(t) = k_{A_y} a_y(t);$$

$$U_{A_0}(t) = k_{A_0} (a_x(t) \cos \alpha + a_y(t) \sin \alpha),$$

где $U_{A_x}(t)$, $U_{A_y}(t)$, $U_{A_0}(t)$ – выходные напряжения акселерометров; k_{A_x} , k_{A_y} , k_{A_0} – коэффициенты передачи акселерометров; α – угол наклона оси чувствительности не ортогонального акселерометра A_0 .

Анализ полученных уравнений показывает, что для упрощения алгоритмов обработки информации необходимо чтобы $\alpha=45^\circ$. Сделав предположение о том, что используются однотипные акселерометры, т.е. $k_{A_x} = k_{A_y} = k_{A_0}$, представим оценки выходных напряжений акселерометров следующим образом:

$$\hat{U}_{A_x}(t) = \frac{2}{\sqrt{2}} U_{A_0}(t) - U_{A_y}(t);$$

$$\hat{U}_{A_y}(t) = \frac{2}{\sqrt{2}} U_{A_0}(t) - U_{A_x}(t);$$

$$\hat{U}_{A_0}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} (U_x(t) + U_y(t)),$$

где $\hat{U}_{A_x}(t)$, $\hat{U}_{A_y}(t)$, $\hat{U}_{A_0}(t)$ – оценочные значения выходных напряжений акселерометров.

Математическая модель возмущенного функционирования блока акселерометров с учетом введенной параметризации видов отказов будет иметь вид:

$$\tilde{U}_{A_x}(t) = \tilde{k}_{A_x} a_x(t) + \tilde{U}_{A_{x_0}}(t); \quad \tilde{U}_{A_y}(t) = \tilde{k}_{A_y} a_y(t) + \tilde{U}_{A_{y_0}}(t); \quad \tilde{U}_{A_0}(t) = \tilde{k}_{A_0} \frac{\sqrt{2}}{2} [a_x(t) + a_y(t)] + \tilde{U}_{A_{0_0}}(t),$$

где $\tilde{U}_{A_{x_0}}(t)$ – выходное напряжение акселерометра A_0 при наличии отказов; \tilde{k}_{A_0} – возмущенный коэффициент передачи акселерометра A_0 ; $\tilde{U}_{A_{0_0}}(t)$ – дрейф акселерометра A_0 .

Отклонения показаний акселерометров от оценочных значений, с учетом полученных математических моделей представим в следующем виде:

$$\Delta U_{A_x}(t) = \tilde{U}_{A_x}(t) - \hat{U}_{A_x}(t); \quad \Delta U_{A_y}(t) = \tilde{U}_{A_y}(t) - \hat{U}_{A_y}(t); \quad \Delta U_{A_0}(t) = \tilde{U}_{A_0}(t) - \hat{U}_{A_0}(t),$$

где $\Delta U_{A_x}(t)$, $\Delta U_{A_y}(t)$, $\Delta U_{A_0}(t)$ – отклонение выходного напряжения соответствующих акселерометров от их оценочных значений.

Влияние отказа в том или ином акселерометре на невязки представим в виде табл. 1, при этом учитываем гипотезы об однократном возникновении отказа и неизменности состояния блока акселерометров при диагностировании с точки зрения работоспособности, т.е. отказы в блоке возникают до момента контроля работоспособности и эти отказы возникают только в одном акселерометре из трех. Влияние отказа на соответствующую невязку будем представлять в виде булевой переменной: 1 – отказ влияет на невязку; 0 – отказ не влияет на невязку.

Таблица 1

TL-модель блока

	ΔU_{A_x}	ΔU_{A_y}	ΔU_{A_0}
A_x	1	1	1
A_y	1	1	1
A_0	1	1	1

Анализ полученной таблицы показывает, что отказ одного из акселерометров влияет на значения всех невязок, что определяет возможность применение подобной компоновки для решения задачи определения момента времени возникновения отказа, но не позволяет снимать неопределенность, связанную с местом, классом и видом отказа. Анализ полученных аналитических зависимостей также указывает на то, что независимо от углов установки осей чувствительностей акселерометров к соответ-

ствующим осям базовой системы координат, тремя акселерометрами невозможно обеспечить полное решение задачи глубокого диагностирования.

Для обеспечения диагностируемости отказов между акселерометрами A_x , A_y введем еще один дополнительный акселерометр и рассмотрим вариант компоновки четырех акселерометров, представленный на рис. 3. Проекции на оси чувствительности абсолютного ускорения представим в виде следующих аналитических зависимостей:

$$U_{A_x}(t) = k_{A_x} a_x(t); U_{A_{x_1}}(t) = k_{A_{x_1}} a_x(t);$$

$$U_{A_y}(t) = k_{A_y} a_y(t); U_{A_{y_1}}(t) = k_{A_{y_1}} a_y(t),$$

где $U_{A_{x_1}}(t)$, $U_{A_{y_1}}(t)$ – выходные напряжение акселерометров; $k_{A_{x_1}}$, $k_{A_{y_1}}$ – коэффициенты передачи акселерометров.

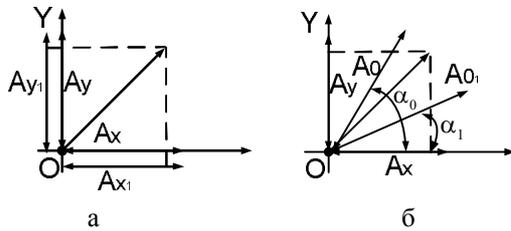


Рис. 3. Компоновка четырех акселерометров при плоскостном движении

Возмущенное поведение акселерометров, с учетом введенной параметризации отказов примет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{A_x}(t) &= \tilde{k}_{A_x} a_x(t) + \tilde{U}_{A_{x0}}(t); \tilde{U}_{A_{x_1}}(t) = \\ &= \tilde{k}_{A_{x_1}} a_x(t) + \tilde{U}_{A_{x_10}}(t); \tilde{U}_{A_y}(t) = \tilde{k}_{A_y} a_y(t) + \\ &+ \tilde{U}_{A_{y0}}(t); \tilde{U}_{A_{y_1}}(t) = \tilde{k}_{A_{y_1}} a_y(t) + \tilde{U}_{A_{y_10}}(t). \end{aligned}$$

Анализ полученных аналитических зависимостей показывает, что рассматриваемая компоновка, так же как и предыдущая, позволяет снимать неопределенность, связанную с моментом времени возникновения отказа, но не обеспечивает решения задач определения места отказа, его класса и вида.

Рассмотрим вариант, когда дополнительные акселерометры не совпадают ни с одной из осей измерительной системы координат (рис. 3, б). Для представленной компоновки измерителей, математическую модель номинального поведения представим в следующем виде:

$$U_{A_x}(t) = k_{A_x} a_x(t); U_{A_y}(t) = k_{A_y} a_y(t);$$

$$U_{A_0}(t) = k_{A_0} (a_x \cos \alpha_0 + a_y \sin \alpha_0);$$

$$U_{A_{0_1}}(t) = k_{A_{0_1}} (a_x(t) \cos \alpha_1 + a_y(t) \sin \alpha_1).$$

Предположим, что $\alpha_1 \neq \alpha_0$, а также пусть $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_0 = 60^\circ$ и $k_{A_0} = k_{A_{0_1}} = k_{A_x} = k_{A_y} = 1$.

С учетом введенных предположений, полученные аналитические выражения примут вид:

$$U_{A_x}(t) = a_x(t); U_{A_y}(t) = a_y(t);$$

$$U_{A_0}(t) = (a_x(t) + \sqrt{3}a_y(t))/2;$$

$$U_{A_{0_1}}(t) = (\sqrt{3}a_x(t) + a_y(t))/2.$$

Оценочные значения выходных сигналов акселерометров будут равны:

$$\hat{U}_{A_x}(t) = 2U_{A_0}(t) - \sqrt{3}U_{A_y}(t);$$

$$\hat{U}'_{A_x}(t) = (2U_{A_{0_1}}(t) - U_{A_y}(t))/\sqrt{3};$$

$$\hat{U}_{A_y}(t) = (2U_{A_0}(t) - U_{A_x}(t))/\sqrt{3}; \hat{U}'_{A_y}(t) =$$

$$= 2U_{A_{0_1}}(t) - \sqrt{3}U_{A_x}(t); \hat{U}_{A_0}(t) = (U_{A_x}(t)/2) +$$

$$+(\sqrt{3}U_{A_y}(t)/2); \hat{U}_{A_{0_1}}(t) = (\sqrt{3}U_{A_x}(t) + U_{A_y}(t))/2.$$

Полученные аналитические зависимости позволяют сформировать предикатные уравнения для решения задач определения момента времени возникновения отказа и его места:

$$\begin{aligned} z_0 &= S_2 \left\{ \left(|\Delta U_{A_0}(t)| \leq \delta_0 \right) \& \left(|\Delta U'_{A_0}(t)| \leq \delta_0 \right) \right\} = \\ &= \begin{cases} 1 - \text{if } \delta_0 \leq \delta_0; \\ 0 - \text{if } \delta_0 > \delta_0; \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= S_2 \left\{ \left| \Delta U_{A_x}(t) \right| - \left| \Delta U'_{A_x}(t) \right| \approx 0 \right\} = \\ &= \begin{cases} 1 - \text{if } \delta_0 \leq \delta_0; \\ 0 - \text{if } \delta_0 > \delta_0; \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_2 &= S_2 \left\{ \left| \Delta U_{A_y}(t) \right| - \left| \Delta U'_{A_y}(t) \right| \approx 0 \right\} = \\ &= \begin{cases} 1 - \text{if } \delta_0 \leq \delta_0; \\ 0 - \text{if } \delta_0 > \delta_0; \end{cases} \end{aligned}$$

$$z_3 = S_2 \left\{ \left| \Delta U'_{A_0}(t) \right| \leq \delta_1 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{if } \delta_0 \leq \delta_1; \\ 0 - \text{if } \delta_0 > \delta_1. \end{cases}$$

Полученные предикатные уравнения позволили разработать алгоритм диагностического обеспечения, который представлен в виде дихотомического дерева на рис. 4.

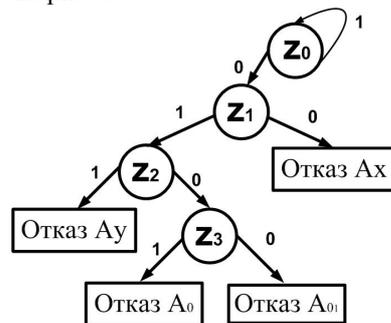


Рис. 4. Дихотомическое дерево определения момента времени возникновения отказа и его места

На данном этапе исследований можно сформировать зависимость, позволяющую определить минимально необходимое количество измерителей, обеспечивающих глубокую диагностируемость:

$$N = n + 2, \quad (3)$$

где n – количество степеней свободы по измеряемому параметру; N – минимально необходимое количество измерителей, обеспечивающих глубокое диагностирование при n степенях свободы.

В векторно-матричном виде математическую модель блока акселерометров можно представить следующим образом: $\bar{U}(t) = K\bar{a}(t)$, где $\bar{U}(t)$ – вектор выходных напряжений измерительного блока; K – матрица коэффициентов передачи акселерометров; $\bar{a}(t)$ – вектор измеряемого параметра. Тогда второе условие обеспечения глубокой диагностируемости примет вид: измерители необходимо компоновать относительно осей измерительной системы координат таким образом, чтобы выполнялось равенство: $L = N$ и $\Delta_i \neq 0, \forall i = \overline{1, N}$, где L – количество линейно независимых строк матрицы K ; $C_N^n = \frac{N!}{2!n!}$.

3. Плоскостное движение МЛА, учитывающее влияния угловой скорости

Полученные результаты основываются на плоском движении, без учета влияния угловой скорости относительно оси OZ . Докажем справедливость полученных обобщений и для случая плоского движения объекта при наличии угловой скорости. Также будем учитывать тот факт, что измерители находятся на определенном расстоянии от т. O (рис. 5), а начало координат измерительной системы координат совпадает с центром масс МЛА.

Математическую модель номинального поведения с учетом представленной компоновки представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{A_1}(t) &= k_{A_1} \left[a_x(t) \cos \alpha_1 + a_y(t) \sin \alpha_1 - R_1 \omega_z^2(t) \right]; \\ U_{A_2}(t) &= k_{A_2} \left[a_x(t) \cos \alpha_2 + a_y(t) \sin \alpha_2 - R_2 \omega_z^2(t) \right]; \\ U_{A_3}(t) &= k_{A_3} \left[a_x(t) \cos \alpha_3 + a_y(t) \sin \alpha_3 - R_3 \omega_z^2(t) \right]; \\ U_{A_4}(t) &= k_{A_4} \left[a_x(t) \cos \alpha_4 + a_y(t) \sin \alpha_4 - R_4 \omega_z^2(t) \right]. \end{aligned}$$

Предположим, что используются однотипные акселерометры и их коэффициент передачи равен единице, тогда:

$$\begin{aligned} U_{A_1}(t) &= a_x(t) \cos \alpha_1 + a_y(t) \sin \alpha_1 - R_1 \omega_z^2(t); \\ U_{A_2}(t) &= a_x(t) \cos \alpha_2 + a_y(t) \sin \alpha_2 - R_2 \omega_z^2(t); \end{aligned}$$

$$U_{A_3}(t) = a_x(t) \cos \alpha_3 + a_y(t) \sin \alpha_3 - R_3 \omega_z^2(t);$$

$$U_{A_4}(t) = a_x(t) \cos \alpha_4 + a_y(t) \sin \alpha_4 - R_4 \omega_z^2(t).$$

Преобразовав полученные уравнения, получим:

$$\begin{aligned} a_x(t) &= \frac{1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[U_{A_1}(t) \sin \alpha_2 - U_{A_2}(t) \sin \alpha_1 + \omega_z^2(t)(R_1 \sin \alpha_2 - R_2 \sin \alpha_1) \right]; \\ a_y(t) &= \frac{1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[U_{A_2}(t) \cos \alpha_1 - U_{A_1}(t) \cos \alpha_2 + \omega_z^2(t)(R_2 \cos \alpha_1 - R_1 \cos \alpha_2) \right]; \\ a_x(t) &= \frac{1}{\sin(\alpha_4 - \alpha_3)} \left[U_{A_3}(t) \sin \alpha_4 - U_{A_4}(t) \sin \alpha_3 + \omega_z^2(t)(R_3 \sin \alpha_4 - R_2 \sin \alpha_3) \right]; \\ a_y(t) &= \frac{1}{\sin(\alpha_4 - \alpha_3)} \left[U_{A_4}(t) \cos \alpha_3 - U_{A_3}(t) \cos \alpha_4 + \omega_z^2(t)(R_4 \cos \alpha_3 - R_3 \cos \alpha_4) \right]. \end{aligned}$$

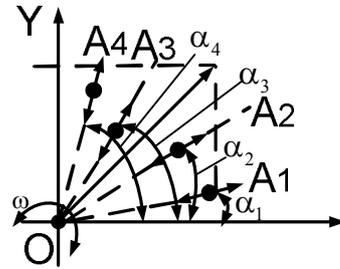


Рис. 5. Плоскостное движение МЛА с учетом вращения

Анализ полученных выражений показывает, что для обеспечения условия $U_{A_j} = f(U_{A_i})$, где $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N-1}$, причем $i \neq j$, необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_3)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_4)} \neq \frac{\sin(\alpha_3 - \alpha_1)}{\sin(\alpha_4 - \alpha_1)}; \\ R_3 = R_1 \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_3)}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} + R_2 \frac{\sin(\alpha_3 - \alpha_1)}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}; \\ R_4 = R_1 \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_4)}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} + R_2 \frac{\sin(\alpha_4 - \alpha_1)}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}. \end{cases} \quad (4)$$

Выполнение полученных условий при установке акселерометров позволяет определять техническое состояние датчиков без использования внешней дополнительной информации с глубиной до вида отказа.

Заключение

В результате исследования различных вариантов компоновок акселерометров для решения задач глубокого диагностирования можно сформулировать

вать условия, позволяющие обеспечить решения сформулированных задач с глубиной до вида отказа:

1. Минимально необходимое количество измерителей должно удовлетворять условию (3).

2. Измерители необходимо компоновать относительно осей измерительной системы координат таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$L = N$$

и

$$\Delta_i \neq 0, \forall i = 1, C_N^n,$$

где L – количество линейно независимых строк матрицы K ; $C_N^n = \frac{N!}{2!n!}$.

$$C_N^n = \frac{N!}{2!n!}$$

3. Располагать i -й дополнительный датчик необходимо таким образом, чтобы выполнялось условие (4).

Литература

1. Фірсов С.М. Система управління літальними апаратом нетрадиційної аеродинамічної схеми для задач точного землеробства / С.М. Фірсов, Куок Туан До, О.В. Данченко, Р.М. Гуш // Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток наукових досліджень 2008». – Т. 6. – С. 80-82.

2. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы / А.С. Кулик // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-тет, 2000. – Вып. 15. – С. 18-31.

3. Кулик А.С. Восстановление измерений навигационной системы в режиме реального времени / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, Куок Туан До, О.Ю. Златкин // Авиационно-космическая техника и технология, 2008. – № 5 (52). – С. 28-33.

Поступила в редакцию 21.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Авиационные приборы и измерения» Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ГЛУБОКОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ПРИ ПЛОЩИННОМУ РУСІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

С.М. Фірсов, До Куок Туан

У статті відбита проблематика діагностичного забезпечення блоку акселерометрів, здатного діагностувати його технічний стан з глибиною до виду відмови з подальшим відновленням працездатності вимірювача, що відмови в режимі реального часу. За результатами досліджень різноманітних варіантів компоновки вимірювачів для задач одновісного та площинного руху малогабаритного літального апарату, отримано критерії, виконання яких дозволяє забезпечити глибоке діагностування блоку акселерометрів без використання додаткової інформації від інших вимірювальних блоків системи управління за умов мінімальної апаратної надлишковості.

Ключові слова: відмовостійкість, діагностування, акселерометр, відмова, матриця зв'язку, прискорення, кутова швидкість.

PROFOUND DIAGNOSING OF ACCELEROMETER UNIT AT FLAT MOVEMENT OF AIRCRAFT

S.N. Firsov, Do Kuok Tuan

Problems of real-time diagnosing of accelerometer unit, allowing to diagnose its technical state with a depth to the type of refuse, and subsequent real-time restoration of faulty measuring device is presented in the article. Different variants of arrangement of measuring devices for the tasks of single-axis and flat movement of small aircraft were researched. As a result of fact criteria are got for profound diagnosing of accelerometer unit without the use of additional information from other type measuring blocks of control system and at presence of minimum hardware redundancy.

Key words: fault tolerance, diagnosing, navigation, accelerometer, matrix of interconnection, acceleration, angular speed.

Фирсов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: firsov@d3.khai.edu, sn.firsov@gmail.com.

До Куок Туан – аспирант кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.