

ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ К ОТКАЗАМ СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ

В результате проведенного исследования предложены аналитические средства для определения количества избыточных измерителей и описания их расположения в блоке. Определены критерии, выполнение которых обеспечивает функциональную устойчивость при однократном отказе одного из одноосных датчиков соответствующего блока.

Введение

Исследование космического пространства и успешные результаты его освоения неизбежно приводят к расширению круга задач, связанных с научно-исследовательским и прикладным использованием спутниковых систем [1]. Особенность их функционирования, связанная с удаленностью космических объектов и невозможностью оперативного устранения аномалий в их работе, способствует появлению новых специфических требований к работоспособности элементов таких систем на этапах проектирования, разработки и эксплуатации [2].

Отказы элементов и блоков спутниковых систем вследствие возникновения нештатных ситуаций представляют собой одну из основных проблем при выполнении заданных миссий [3]. По результатам статистических исследований отказов космических спутников, наиболее уязвимой системой, подверженной техническим поломкам, неисправностям и сбоям, является система ориентации и стабилизации, а также ее основные элементы, связанные с измерением параметров движения [4, 5].

Практика широкого использования пико-, нано- и микроспутников для решения научно-исследовательских и прикладных задач обусловила необходимость расширения функциональных возможностей спутниковых бортовых систем для парирования нештатных ситуаций. Это реализуется обеспечением функциональной устойчивости бортовых систем к различным поломкам, неисправностям, сбоям и другим аномалиям, т. е. к отказам, в частности, систем стабилизации и ориентации и ее чувствительных элементов, входящих в бесплатформенный астроинерциальный блок (БАИБ) [5–7]. Под функциональной устойчивостью здесь понимается способность системы, устройства, блока, к числу которых относятся и блоки одноосных измерителей угловых и линейных параметров движения (БИПД) [8–10], выполнять требуемые функции в течение заданного времени при наличии нештатных ситуаций.

Наиболее распространенная схема компоновки БИПД для обеспечения надежности состоит в использовании трех однотипных измерителей по каждому каналу, оси которых ортогональны друг другу и совпадают (или параллельны) с осями связанной с объектом системы координат. При этом проводится мажори-

тарная схема обработки [11]. Подобное расположение довольно простое и при незначительном усовершенствовании алгоритмов обработки измеряемой информации позволяет решать задачи глубокого диагностирования БИПД, заключающегося в поиске устранимой посредством имеющихся избыточных ресурсов причины отказа с декомпозицией этого процесса на четыре этапа. Первый этап – системный. Здесь решается задача обнаружения отказа. Второй этап – компонентный, на нем решается задача поиска отказавшего компонента – места отказа. Этап третий – внутрикомпонентный, на котором определяется, к какому классу принадлежит отказ. Заключительный этап – причинный. На этом этапе устанавливается устранимая в последующем причина нарушения функциональных свойств конкретного элемента с последующим переходом к решению задачи гибкого восстановления измерений в режиме реального времени. Парирование нештатных ситуаций посредством гибкого управления избыточными средствами базируется на следующих принципиальных положениях: множество парлируемых нештатных ситуаций зависит от функциональных возможностей, имеющихся на борту избыточных средств, формирование которых производится с учетом ряда противоречивых требований, вытекающих из необходимых требований точности стабилизации и минимизации веса и энергопотребления бортовой аппаратуры. Таким образом, задача компоновки БИПД с определением минимальной аппаратной избыточности и обеспечением возможности функциональной устойчивости бортовой аппаратуры, соответствующего мажоритарной схеме, является актуальной.

Задачи исследования

Задача исследования заключается в формировании критериев, выполнение которых обеспечивает функциональную устойчивость БИПД при возникновении нештатных ситуаций, связанных с появлением как внезапных, так и постепенных отказов в БИПД. При этом считаем, что отказ – это неопределённое событие. Неопределённость обусловлена такими факторами, как момент появления отказа, местом его возникновения, определением принадлежности его к классу и его конкретным видом. Класс отказа – это подмножество отказов, характеризующееся однотипными свойствами.

При формировании избыточных БИПД необходимо обеспечить выполнение следующих условий.

1. Количество одноосных измерителей должно обеспечивать диагностируемость БИПД [12, 13]. Диагностируемость – это свойство БИПД, характеризующее возможность однозначного установления в нем факта наличия отказа по доступным наблюдениям измерений в течение конечного интервала времени.
2. Использовать информацию, получаемую в диагностируемом измерительном блоке от однотипных датчиков, имеющих одинаковые характеристики по точности, без привлечения внешних измерителей, что соответствует обеспечению автономной функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации (ССО) [14, 15].
3. Избыточность не должна влиять на основные функциональные задачи, решаемые БИПД.

Определение количества датчиков в БИПД

Рассмотрим в качестве примера измерительную систему, предназначенную для измерения вектора кажущегося ускорения, построенную на одноосных ак-

селерометрах. Отметим, что полученные результаты справедливы и для измерителей угловых скоростей. Для определения абсолютного значения кажущегося ускорения необходимо измерение трех проекций на соответствующие оси связанной системы координат. При решении задачи обеспечения функциональной устойчивости с использованием вероятностных критериев теории надежности для гипотезы однократного отказа необходимо трехкратное резервирование одноосных датчиков. Для более жестких гипотез, таких как двукратные отказы и более, подобный подход приводит к увеличению количества измерителей

$$N = 1 + 2v,$$

где N – необходимое количество измерителей в мажоритарной схеме для реализуемости выполнения гипотезы v -кратного возникновения отказа. При этом компоновка акселерометров по мажоритарной схеме представляет собой избыточный измеритель векторной величины.

В общем случае минимальное число векторов, образующих измерительный базис в трехмерном пространстве, равно трем ($N_0=3$). Это означает, что для измерения векторной величины необходимо реализовать измерительный базис, образуемый системой трех векторов, связанных с осями чувствительности измерителей.

Получим оценку эффективности использования избыточного числа измерителей на основе рассмотрения свойств векторных пространств. Для этого ориентацию оси чувствительности одноосного измерителя будем характеризовать единичным вектором. При резервировании одноосных измерителей отдельные группы измерителей имеют коллинеарное направление оси чувствительности, поэтому векторы, связанные с этими осями чувствительности, являются линейно зависимыми. Таким образом, несколько резервированных в одном направлении измерителей не могут входить в неизбыточный векторный измеритель и их число будет равным

$$N_p = N_0^{N/N_0} = 3^{9/3} = 27.$$

Поскольку оси чувствительности N датчиков ориентированы как не коллинеарные единичные векторы, соответствующие этим осям, то число избыточных векторных измерителей, формируемых в этом случае, определяется с использованием зависимости

$$N_{II} = C_N^{N_0} = \frac{N!}{N_0!(N - N_0)!} = \frac{9!}{3!(9 - 3)!} = 84.$$

Таким образом, видно, что наиболее эффективно избыточность может быть использована, если обеспечивается линейная независимость всех единичных векторов, связанных с ориентацией осей чувствительности одностепенных измерителей. В этом случае имеется наибольшая возможность замены отказавшего неизбыточного векторного измерителя исправным, либо возможностью формирования наибольшего числа неизбыточных векторных измерителей

$$N_{II} > N_p.$$

Различные варианты расположения одноосных измерителей показывают, что применяемые мажоритарные схемы не позволяют рационально использовать введенные виды избыточностей для парирования более одного отказа по соответствующей измерительной оси. Выполнение условия неколлинеарного расположения осей чувствительности позволяет обеспечить количество измери-

тельных базисов, соответствующее четырехкратному резервированию ($N_p = N_0^{N/N_0} = 3^{12/3} = 81$) при том же количестве измерителей.

Несложно показать, что при рассмотрении одноосного движения динамического объекта, обеспечение функциональной устойчивости его измерительных блоков при полных однократных отказах достигается тремя одноосными измерителями. Причем варианты могут быть различные: два измерителя скорости в сочетании с одним измерителем ускорения; по одному измерителю координаты, скорости, ускорения и т.д. Следовательно, если необходимо обеспечить функциональную устойчивость измерительного блока, то он должен состоять из N одноосных измерителей

$$N = n + 2, \quad (1)$$

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

измерители необходимо компоновать относительно осей измерительной системы координат таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$L = N \text{ и } \Delta_i \neq 0, \forall i = \overline{1, C_N^n}, \quad (2)$$

где L – количество линейно независимых строк матрицы направляющих косинусов расположения датчиков относительно связанной системы координат; Δ_i – определитель i -й матрицы размерностью $n \times n$, выделенной из матрицы направляющих косинусов расположения датчиков относительно связанной системы координат; $C_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}$.

Объясним сформулированные требования на различных компоновках БИПД. При этом предполагаем, что датчики устанавливаются с требуемой точностью, матрица погрешностей их установки не учитывается, погрешности измерений в номинальном режиме соответствуют функциональным требованиям по точности.

Рассмотрим случай трехмерного движения объекта. На основании (1) определяем, что минимально необходимое количество измерителей равно 5. Предположим, что это требование не правомочно и имеет место решение задачи глубокого диагностирования с применением четырех акселерометров. Оси чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z совпадают с осями измерительной системы координат Ox, Oy, Oz соответственно. Для данного случая допустим, что центр измерительного трехгранника совпадает с центром масс. Все три датчика располагаются на расстоянии R от начала системы координат. Ось чувствительности акселерометра A_0 совпадает с диагональю куба, образованного осями чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z , и он располагается на расстоянии $\sqrt{3}R$ от начала отсчета. Такое расположение датчиков обосновывается тем, что необходимо обеспечить выполнение утверждения (2).

Учитывая расположение акселерометров и влияние на их показание проекций угловой скорости, значения выходных сигналов A_x, A_y, A_z будут определяться следующими зависимостями:

$$U_{A_x}(t) = k_{A_x} \{a_x(t) - [\omega_y^2(t) + \omega_z^2(t)] R_{AK_x}\}; \quad (3)$$

$$U_{A_y}(t) = k_{A_y} \{a_y(t) - [\omega_x^2(t) + \omega_z^2(t)] R_{AK_y}\}; \quad (4)$$

$$U_{A_z}(t) = k_{A_z} \{a_z(t) - [\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t)] R_{AK_z}\}, \quad (5)$$

где $R_{AK_x} = R_{AK_y} = R_{AK_z} = R$ – расстояние от начала координат до акселерометров A_x, A_y, A_z соответственно; $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ – проекции кажущихся ускорений на оси чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z ; $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$ – проекции вектора угловой скорости вращения на соответствующие оси измерительной системы координат; $k_{A_x} = k_{A_y} = k_{A_z}$ – коэффициенты передачи акселерометров A_x, A_y, A_z соответственно.

Учитывая расположение акселерометра A_0 , его выходной сигнал будет определяться по следующей зависимости:

$$U_{A_0}(t) = \frac{k_{A_0}}{\sqrt{3}} \left\{ [a_x(t) - (\omega_y^2(t) + \omega_z^2(t))R] + \right. \\ \left. + [a_y(t) - (\omega_x^2(t) + \omega_z^2(t))R] + [a_z(t) - (\omega_x^2(t) - \omega_y^2(t))R] \right\}, \quad (6)$$

где $k_{A_0} = k_{A_x} = k_{A_y} = k_{A_z}$ – коэффициент передачи A_0 .

Так как используются однотипные акселерометры с одинаковым коэффициентом передачи, то выражение (6) с учетом (3) – (5) примет вид

$$U_{A_0}(t) = [U_{A_x}(t) + U_{A_y}(t) + U_{A_z}(t)] / \sqrt{3}. \quad (7)$$

Особенность аналитической зависимости (7) заключается в том, что, не имея информации об угловой скорости вращения измерительной системы и кажущегося ускорения, а располагая только значениями напряжений на выходах компонент БИПД, решается задача диагностического обеспечения, связанная с определением момента времени возникновения отказа в БИПД в результате сравнения оценочного значения напряжения неортогонального акселерометра с его действительным измеряемым параметром.

Сформируем выражения для оценок напряжений на выходах элементов БИПД. На основании (7) формируем выражения для оценочных значений напряжений на выходах акселерометров:

$$\hat{U}_{A_0}(t) = [U_{A_x}(t) + U_{A_y}(t) + U_{A_z}(t)] / \sqrt{3} \quad \hat{U}_{A_x}(t) = \sqrt{3}U_{A_0}(t) - [U_{A_y}(t) + U_{A_z}(t)];$$

$$\hat{U}_{A_y}(t) = \sqrt{3}U_{A_0}(t) - [U_{A_x}(t) + U_{A_z}(t)];$$

$$\hat{U}_{A_z}(t) = \sqrt{3}U_{A_0}(t) - [U_{A_x}(t) + U_{A_y}(t)],$$

где $\hat{U}_{A_0}(t), \hat{U}_{A_x}(t), \hat{U}_{A_y}(t)$ и $\hat{U}_{A_z}(t)$ – оценочные значения напряжений на выходах акселерометров A_0, A_x, A_y и A_z соответственно.

Отклонение выходного напряжения соответствующих акселерометров от их оценочных значений равны

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

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

Анализ влияния отказа в том или ином акселерометре на отклонения выходных напряжений акселерометров, показывает, что отказ одного из акселерометров влияет на значения всех отклонений. Это позволяет применить подобную компоновку для решения задачи определения момента времени возникно-

вения отказа, а также позволяет частично снимать неопределенность, связанную с местом, классом и видом отказа.

Вместе с тем, четыре акселерометра не обеспечивают полное решение задачи диагностирования с глубиной до парируемого вида, что противоречит рассматриваемой гипотезе.

Для обеспечения глубокой диагностируемости БИПД рассмотрим компоновку блока на пяти акселерометрах (рис. 1). Как и для четырех акселерометров, предполагаем применение однотипных акселерометров, тогда значения выходных сигналов соответствующих акселерометров, без учета угловых скоростей, равны:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= \frac{1}{2}a_x(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}a_y(t); U_2(t) = a_y(t) + a_z(t); U_3(t) = a_z(t); \\ U_4(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}}a_x(t) - \frac{1}{\sqrt{3}}a_y(t) + \frac{1}{\sqrt{3}}a_z(t); \\ U_5(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}}a_x(t) + \frac{1}{\sqrt{3}}a_y(t) - \frac{1}{\sqrt{3}}a_z(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Запишем (8) в векторно-матричном виде

$$\bar{U}(t) = K\bar{A}(t), \quad (9)$$

где

$$\bar{U}(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \\ U_4(t) \\ U_5(t) \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}; \bar{A}(t) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{bmatrix}.$$

Анализ матрицы K показывает, что все ее строки линейно независимы, а все $\Delta_i \neq 0$ размерностью $(3 \times 3) \forall i = \overline{1,10}$, что соответствует условию (2), следовательно, блок, состоящий из пяти датчиков, диагностируем с глубиной до парируемого вида отказа.

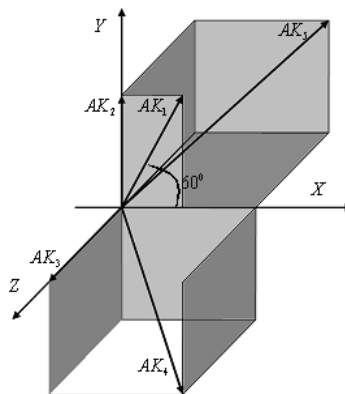


Рис. 1. Размещение осей чувствительности в избыточном измерителе

Полнота исследования требует рассмотрения алгоритма диагностирования блока измерителей с глубиной до места отказа. Понятно, что при 4 акселерометрах имеем только пару значений ускорений (одно вдоль оси, другое спроектированное на эту ось), по значениям которых не определить, какой из акселерометров отказал. Поэтому 5-й акселерометр добавляет третье значение ускорения вдоль указанной оси, что позволяет по мажоритарному признаку выбрать один из отказавших.

Из системы (8) можно получить зависимость для определения оценочных значений напряжений, например, для 4-го и 5-го акселерометров:

$$\hat{U}_4(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} U_1(t) - \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{3}} U_2(t) + \frac{1}{\sqrt{3}} U_3(t); \quad (10)$$

$$\hat{U}_1(t) = \frac{1}{2} [\sqrt{3} U_4(t) + (\sqrt{3}+1) U_2(t) - U_3(t)]. \quad (11)$$

Используя полученные аналитические зависимости, формируем следующее предикатное уравнение для определения отказа в четвертом и пятом акселерометрах:

$$\begin{aligned} z_1 &= S_2 \left\{ \left[\Delta_1 = U_1(t) - \hat{U}_1(t) \right] \leq \delta_0 \right\} = \\ &= \left\{ U_1(t) - \frac{1}{2} [\sqrt{3} U_4(t) + (\sqrt{3}+1) U_2(t) - U_3(t)] \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 \text{ отказ } A_5; \\ 0 \text{ отказ } A_1, A_2, A_3, A_4; \end{cases} \\ z_2 &= \left\{ \left[\Delta_2 = U_2(t) - \hat{U}_2(t) \right] \approx 0 \right\} = \\ &= S_2 \left\{ U_2(t) - \frac{1}{1-\sqrt{3}} [\sqrt{3} U_5(t) - 2 U_1(t) + U_3(t)] \right\} = \begin{cases} 1 \text{ отказ } A_4, \\ 0 \text{ отказ } A_1, A_2, A_3, \end{cases} \end{aligned}$$

где z_i $i=1,2$ – двухзначный предикат, описывающий процесс сравнения выходов акселерометров с их оценочными значениями; S_2 – символ двухзначного предиката.

Аналогичным образом формируем предикатные уравнения для обнаружения отказа в остальных акселерометрах, а также по определению класса и парируемого вида отказа. На основе полученных зависимостей сформирован алгоритм диагностирования с глубиной до парируемого вида отказа, фрагмент которого представлен на рис. 2. На рис. 2 введены следующие обозначения: α_{A_i} $i=1,3$ – элементы множества классов отказов пятого акселерометра; $z_{l_{ij}}$ $i=1,3$; $j=1,2$ – двухзначные предикаты, описывающие соответствующие преобразования, например:

$$\begin{aligned} z_{11} &= s_2 \{ \Delta U_5(k) - \Delta U_5(k-1) \approx 0 \} = \begin{cases} 0 - \text{изменение } K_{A_5}; \\ 1 - \text{дрейф } A_5; \end{cases} \\ z_{111} &= s_2 \{ \Delta U_5(k) > 0 \} = \begin{cases} 0 - \text{отрицательный дрейф } A_5; \\ 1 - \text{положительный дрейф } A_5. \end{cases} \end{aligned}$$

Рассмотрим более сложный случай произвольного размещения акселерометров с влиянием вращения на показания датчиков. Для этого введем вектор

$\overline{OB}(t)$ с координатами $\overline{OB}(t) = [L(t)\cos\alpha \ L(t)\cos\beta \ L(t)\cos\gamma]^T$ и вектор $\overline{OA}(t)$ с координатами $\overline{OA}(t) = [\omega_x(t) \ \omega_y(t) \ \omega_z(t)]^T$. Модули векторов $\overline{OB}(t)$ и $\overline{OA}(t)$ обозначим $L(t)$ и $\omega(t)$ соответственно. С учетом введенных обозначений угол φ между векторами $\overline{OB}(t)$ и $\overline{OA}(t)$ равен

$$\cos\varphi(t) = \frac{\omega_x(t)\cos\alpha + \omega_y(t)\cos\beta + \omega_z(t)\cos\gamma}{\omega(t)}.$$

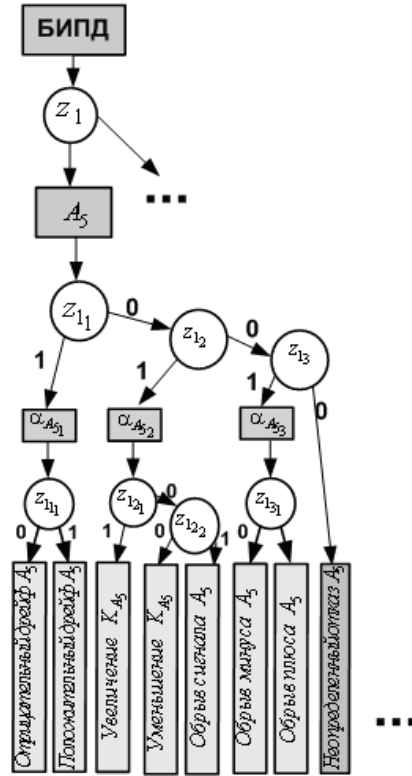


Рис. 2. Фрагмент дихотомического дерева диагностирования БИПД с глубиной до парируемого вида отказа

Тогда напряжение на выходе рассматриваемого акселерометра равно

$$\begin{aligned} \tilde{U}(t) = & a_x(t)\cos\alpha + a_y(t)\cos\beta + a_z(t)\cos\gamma - \\ & - R_0 \left\{ \omega^2(t) - [\omega_x(t)\cos\alpha + \omega_y(t)\cos\beta + \omega_z(t)\cos\gamma]^2 \right\}. \end{aligned}$$

Для случая пяти датчиков получена система уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_1(t) = & a_x(t)\cos\alpha_1 + a_y(t)\cos\beta_1 + a_z(t)\cos\gamma_1 - \\ & - R_1 \left[\omega_x^2(t)\sin^2\alpha_1 + \omega_y^2(t)\sin^2\beta_1 + \omega_z^2(t)\sin^2\gamma_1 \right]; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_2(t) = & a_x(t)\cos\alpha_2 + a_y(t)\cos\beta_2 + a_z(t)\cos\gamma_2 - \\ & - R_2 \left[\omega_x^2(t)\sin^2\alpha_2 + \omega_y^2(t)\sin^2\beta_2 + \omega_z^2(t)\sin^2\gamma_2 \right]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}\tilde{U}_3(t) = & a_x(t)\cos\alpha_3 + a_y(t)\cos\beta_3 + a_z(t)\cos\gamma_3 - \\ & - R_3 \left[\{\omega_x^2(t)\sin^2\alpha_3 + \omega_y^2(t)\sin^2\beta_3 + \omega_z^2(t)\sin^2\gamma_3\} \right];\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\tilde{U}_4(t) = & a_x(t)\cos\alpha_4 + a_y(t)\cos\beta_4 + a_z(t)\cos\gamma_4 - \\ & - R_4 \left[\{\omega_x^2(t)\sin^2\alpha_4 + \omega_y^2(t)\sin^2\beta_4 + \omega_z^2(t)\sin^2\gamma_4\} \right];\end{aligned}\quad (15)$$

$$\begin{aligned}\tilde{U}_5(t) = & a_x(t)\cos\alpha_5 + a_y(t)\cos\beta_5 + a_z(t)\cos\gamma_5 - \\ & - R_5 \left[\{\omega_x^2(t)\sin^2\alpha_5 + \omega_y^2(t)\sin^2\beta_5 + \omega_z^2(t)\sin^2\gamma_5\} \right].\end{aligned}\quad (16)$$

В векторно-матричном виде уравнения (12) – (16), примут вид

$$U(t) = C\bar{A}(t) - P\Omega(t), \quad (17)$$

где $U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) & U_2(t) & U_3(t) & U_4(t) & U_5(t) \end{bmatrix}^T$ – вектор напряжений на выходах

акселерометров; $C = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\beta_1 & \cos\gamma_1 \\ \cos\alpha_2 & \cos\beta_2 & \cos\gamma_2 \\ \cos\alpha_3 & \cos\beta_3 & \cos\gamma_3 \\ \cos\alpha_4 & \cos\beta_4 & \cos\gamma_4 \\ \cos\alpha_5 & \cos\beta_5 & \cos\gamma_5 \end{bmatrix}$ – матрица направляющих косинусов, определяющих положения осей чувствительности соответствующих акселерометров; $\bar{A}(t) = \begin{bmatrix} a_x(t) & a_y(t) & a_z(t) \end{bmatrix}^T$ – вектор измеряемого ускорения;

$P = \begin{bmatrix} R_1 \sin^2\alpha_1 & R_1 \sin^2\beta_1 & R_1 \sin^2\gamma_1 \\ R_2 \sin^2\alpha_2 & R_2 \sin^2\beta_2 & R_2 \sin^2\gamma_2 \\ R_3 \sin^2\alpha_3 & R_3 \sin^2\beta_3 & R_3 \sin^2\gamma_3 \\ R_4 \sin^2\alpha_4 & R_4 \sin^2\beta_4 & R_4 \sin^2\gamma_4 \\ R_5 \sin^2\alpha_5 & R_5 \sin^2\beta_5 & R_5 \sin^2\gamma_5 \end{bmatrix}$ – матрица, характеризующая расположение акселерометра относительно начала координат связанной системы;

$\Omega(t) = \begin{bmatrix} \omega_x^2(t) & \omega_y^2(t) & \omega_z^2(t) \end{bmatrix}^T$ – вектор-столбец, характеризующий влияние угловых скоростей на показания акселерометров.

В результате выполнения ряда преобразований системы уравнений (18) получены условия установки избыточного числа акселерометров, обеспечивающих глубокое диагностирование БИПД:

$$\begin{aligned}B_1 R_1 \sin^2\alpha_1 + B_2 R_2 \sin^2\alpha_2 + B_3 R_3 \sin^2\alpha_3 &= D R_4 \sin^2\alpha_4; \\ B_1 R_1 \sin^2\beta_1 + B_2 R_2 \sin^2\beta_2 + B_3 R_3 \sin^2\beta_3 &= D R_4 \sin^2\beta_4; \\ B_1 R_1 \sin^2\gamma_1 + B_2 R_2 \sin^2\gamma_2 + B_3 R_3 \sin^2\gamma_3 &= D R_4 \sin^2\gamma_4; \\ C_1 R_1 \sin^2\alpha_1 + C_2 R_2 \sin^2\alpha_2 + C_3 R_3 \sin^2\alpha_3 &= D R_5 \sin^2\alpha_5; \\ C_1 R_1 \sin^2\beta_1 + C_2 R_2 \sin^2\beta_2 + C_3 R_3 \sin^2\beta_3 &= D R_5 \sin^2\beta_5; \\ C_1 R_1 \sin^2\gamma_1 + C_2 R_2 \sin^2\gamma_2 + C_3 R_3 \sin^2\gamma_3 &= D R_5 \sin^2\gamma_5,\end{aligned}\quad (18)$$

где $D = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}$; $R_i, i = \overline{1,5}$ – радиусы-векторы отстояния акселерометров;

$$\begin{aligned} B_1 &= \cos \alpha_4 (\cos \beta_2 \cos \gamma_3 - \cos \beta_3 \cos \gamma_2) + \\ &+ \cos \beta_4 \times (\cos \alpha_3 \cos \gamma_2 - \cos \alpha_2 \cos \gamma_3) + \cos \gamma_4 (\cos \alpha_2 \cos \beta_3 - \cos \beta_2 \cos \alpha_3); \\ B_2 &= \cos \alpha_4 (\cos \gamma_1 \cos \beta_3 - \cos \beta_1 \cos \gamma_3) + \cos \beta_4 \times \\ &\times (\cos \alpha_1 \cos \gamma_3 - \cos \gamma_1 \cos \alpha_3) + \cos \gamma_4 (\cos \alpha_2 \cos \beta_3 - \cos \beta_2 \cos \alpha_3); \\ B_3 &= \cos \alpha_4 (\cos \beta_1 \cos \gamma_2 - \cos \beta_2 \cos \gamma_1) + \cos \beta_4 \times \\ &\times (\cos \alpha_2 \cos \gamma_1 - \cos \alpha_1 \cos \gamma_2) + \cos \gamma_4 (\cos \alpha_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \cos \alpha_2); \\ C_1 &= \cos \alpha_5 (\cos \beta_2 \cos \gamma_3 - \cos \beta_3 \cos \gamma_2) + \cos \beta_5 (\cos \alpha_3 \cos \gamma_2 - \\ &- \cos \alpha_2 \cos \gamma_3) + \cos \gamma_5 (\cos \alpha_2 \cos \beta_3 - \cos \beta_2 \cos \alpha_3); \\ C_2 &= \cos \alpha_5 (\cos \gamma_1 \cos \beta_3 - \cos \beta_1 \cos \gamma_3) + \cos \beta_5 (\cos \alpha_1 \cos \gamma_3 - \\ &- \cos \gamma_1 \cos \alpha_3) + \cos \gamma_5 (\cos \beta_1 \cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 \cos \beta_3); \\ C_3 &= \cos \alpha_5 (\cos \beta_1 \cos \gamma_2 - \cos \beta_2 \cos \gamma_1) + \cos \beta_5 (\cos \alpha_2 \cos \gamma_1 - \\ &- \cos \alpha_1 \cos \gamma_2) + \cos \gamma_5 (\cos \alpha_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \cos \alpha_2). \end{aligned}$$

Выполнение тождеств (19) позволяет формировать компоновку пяти измерителей БИПД, обеспечивающую глубокую диагностируемость блока.

Выполнение полученных утверждений позволяет сформировать множество вариантов расположения измерителей в блоке, обеспечивающих диагностируемость блока с глубиной до парируемого вида отказа. Выбор варианта компоновки измерителей из сформированного множества определяется удобством применения того или иного способа или другими дополнительными ограничениями исследований.

Парирование отказов

Применяемыми средствами парирования отказов в БИПД являются сигнальная и параметрическая подстройка, а также реконфигурация аппаратуры и алгоритмов. Сигнальная подстройка заключается в формировании дополнительного воздействия, устраняющего последствия компенсируемых видов отказов в целях восстановления потерянной части сигнала с датчика. Сигнальная подстройка заключается в деформации выходного сигнала в зависимости от обнаруженного вида отказа. Параметрическая подстройка предполагает наличие подстраиваемых параметров, значения которых можно целенаправленно изменять для компенсации последствий отказов.

В случае если влияние обнаруженных видов отказов не может быть скомпенсировано сигнальной или параметрической подстройками (обрывы, короткие замыкания, пробой, некомпенсируемое изменение коэффициентов передачи либо некомпенсируемый дрейф статической характеристики), то восстановление БИПД можно осуществить за счет реконфигурации аппаратуры или алгоритмов обработки измерительной информации, предполагающих использование имеющейся в наличии структурной избыточности.

Реконфигурация аппаратуры БИПД заключается в использовании лишь исправных функциональных элементов, в то время как отказавший элемент исключается из контура измерения. В этом случае происходит отключение не только выхода отказавшего функционального элемента, но и его питания по команде от управляющего элемента на соответствующие коммутаторы. Это обеспечивает изоляцию отказавшего функционального элемента от процесса измерения.

В результате исследований связей между видами отказов БИПД и средствами их парирования получено, что одно и то же средство может быть использовано для парирования нескольких видов отказов, а влияние одного и того же вида отказа может быть парировано за счет использования различных средств. Наличие перекрестных связей между средствами парирования и видами отказов обуславливает необходимость разработки метода, позволяющего на основании информации о возникшем виде отказа и текущем состоянии БИПД наиболее эффективно выбрать средство парирования.

Заключение

Проведенный анализ компоновки БИПД избыточным числом чувствительных элементов показал, что для обеспечения глубокого диагностирования их технического состояния с последующим восстановлением их показаний необходимо компоновать измерительный блок таким образом, чтобы выполнялись сформулированные в (1) и (2) утверждения.

Настоящие исследования были направлены на определение необходимого количества измерителей для обеспечения функциональной устойчивости измерительного блока с использованием системного подхода, заключающегося в решении двух взаимосвязанных задач: диагностирования технического состояния измерительного блока с глубиной до вида отказа и гибкого восстановления показаний отказавшего одноосного измерителя в избыточном блоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Емельянец, Г.И.** Особенности построения интегрированной системы ориентации и навигации для орбитального космического аппарата / Г.И. Емельянец [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2011 – №1(72). – С. 17 – 26.
2. **Проектирование** и экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев и др. / Под общ. ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", НПП Хартрон-Аркос, 2012. – 680 с.
3. **Одинцов, Б.В.** К задаче повышения точности определения ориентации космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Гироскопия и навигация. – 2010 – №2(69). – С. 5 – 16.
4. **Андреев, В.А.** Бесплатформенный инерциальный блок СУ АКБ РН "Днепр" / В.А. Андреев [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2006. – №2. – С. 22 – 29.
5. **Пчелинцев, Л.А.** Метод контроля измерительных трактов систем управления движением космических летательных аппаратов / Л.А. Пчелинцев, И.И. Кузнецов, А.С. Ершов // Двойные технологии – 2005. - № 1. - С. 13-15.
6. **Castaldi, P.** Fault Tolerant Control Schemes for Nonlinear Models of Aircraft and Spacecraft Systems [Text] / P. Castaldi, N. Mimm, S. Simani // Preprints of the 18th IFAC World Congress Milan (Italy) August 28 - September 2, 2011 – PP:13705 – 13710.

7. **Huang, Jianzhuang.** Fault-Tolerant Sensor Placement Based on Control Reconfigurability [Text] / Jianzhuang Huang, N. Eva Wu // Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011 – PP:14814 – 14819.
8. **Фирсов, С.Н.** Аналитический метод определения параметров управления системы ориентации космического аппарата // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 4 (91). – С. 55 – 59.
9. **Firsov, S.** Fail-aktive pneumatic servo driver of unmanned aircraft / S. Firsov, O. Pischuchina // *Proceedings east west fuzzy colloquium 2006 13th Zittau Fuzzy colloquim*. – IP: PAM, 2006. – P. 362 – 369.
10. **Фирсов, С.Н.** Диагностируемость блока акселерометров при пространственном движении летательного аппарата / С.Н. Фирсов, До Куок Туан // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2009. – Вып. 4 (61). – С. 14 – 20.
11. **Васильев, В.И.** Алгоритмы обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД / В.И. Васильев, И.И. Идрисов // *Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий: сб. науч. тр.* – Уфа: Гилем, 2008. – С. 185–190.
12. **Кулик, А.С.** Оценка диагностируемости линейных динамических систем // *Автоматика и телемеханика*. –1992.– № 1.– С. 184-187
13. **Кулик, А.С.** Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х: "ХАИ"; Бизнес-Информ, 2000. – 260 с.
14. **Фирсов, С.Н.** Комплексные показатели функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 1 (98). – С. 31 – 38.
15. **Фирсов, С.Н.** Методология обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2013. – №1 (60). – С. 76 – 85.

Abstract. The result of study are proposed analytical tools to determine the number of redundant measuring devices and the description of their location in the block. Implementation of elaborated criteria provides a functional stability for single failure of the one of uniaxial sensors of the appropriate block.

Key words: stabilization and orientation satellite system, functional stability, measuring unit, an accelerometer, angular rate sensor, failure.

Матеріал поступил 11.06.13