

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ

Получены аналитические зависимости, определяющие минимально необходимое количество чувствительных элементов в избыточном измерителе. Сформированы критерии, выполнение которых обеспечивает функциональную устойчивость при однократном полном отказе одного из чувствительных элементов. Показаны ограничения и преимущества использования функционально устойчивого измерительного блока с минимальной структурной избыточностью.

Ключевые слова: спутниковая система стабилизации и ориентации, функциональная устойчивость, измерительный блок, акселерометр, датчик угловых скоростей, отказ.

Высокая точность угловой ориентации и стабилизации спутника может быть обеспечена только в условиях поддержания работоспособного состояния измерителей параметров движения на протяжении всего времени выполнения космической миссии [1]. Для этого необходимо обеспечить измерители параметров движения спутниковых систем стабилизации и ориентации (ССО) функциональной устойчивостью, заключающейся в способности функционального элемента выполнять свои функции с требуемыми показателями качества при наличии нештатных ситуаций, связанных с появлением различного вида дестабилизирующих факторов. Достижение функциональной устойчивости блока, измеряющего состояние объекта, может быть обеспечено путем наделения его способностью самодиагностирования и восстановления [1–3].

В основе такой интеллектуализации лежит системный подход к обеспечению функциональной устойчивости, предложенный в работах [4–8] и использующий принцип самоорганизации и комплексного применения различных средств для сохранения работоспособности при отказах функциональных элементов. Рассматриваемый подход предполагает декомпозировать процесс на два этапа и перейти от пассивной формы обеспечения функциональной устойчивости при появлении нештатных ситуаций к активной, позволяющей парировать появляющиеся отказы, используя при этом все возможные избыточные ресурсы, что не возможно при использовании алгоритмического [9] и структурного [10] подходов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как измерители параметров движения принадлежат к объектам с неизвестным входом, в качестве средства, обеспечивающего выполнение критерия структурной диагностируемости, предлагается введение структурной избыточности. Одним из примеров введения структурной избыточности является мажоритарная схе-

ма включения чувствительных элементов (ЧЭ) – три акселерометра и три датчика угловой скорости по каждой оси системы координат, связанной с малым космическим аппаратом (МКА). Указанная схема обеспечивает полную диагностируемость с глубиной до места отказа, однако, введение чрезмерного количества ЧЭ приводит к увеличению массы, габаритов, энергопотребления и стоимости.

Таким образом, исследования, описанные в данной статье, направлены на формирования минимально избыточных измерительных систем, обеспечивающих выполнение следующих условий:

- 1) количество измерителей должно обеспечивать выполнение критерия структурной диагностируемости измерительного блока;
- 2) для решения задач диагностирования и восстановления с целью минимизации погрешностей измерения необходимо использовать информацию, получаемую в диагностируемом измерительном блоке от однотипных датчиков, имеющих одинаковые характеристики по точности, без привлечения внешних измерителей;
- 3) избыточность не должна влиять на основные функциональные задачи, решаемые диагностируемой измерительной системой;
- 4) уровень обеспечения функциональной устойчивости измерительной системы избыточной структуры должен быть не ниже уровня мажоритарной схемы.

АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА С МАЖОРИТАРНЫМ ПРИНЦИПОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Рассмотрим измерительную систему, предназначенную для измерения вектора кажущегося ускорения, построенную на акселерометрах. Для определения абсолютного значения этого вектора при пространственном движении необходимо измерение трех проекций на соответствующие оси выбранной системы координат. Если

подходить к вопросу решения задачи обеспечения отказоустойчивости выбранной измерительной системы с позиции теории надежности, то для выполнения гипотезы работы системы при однократном отказе необходимо трехкратное резервирование датчиков по соответствующим осям базовой системы координат. Для более жестких гипотез, связанных с обеспечением работоспособности при двукратных отказах, подобный подход приводит к увеличению соответствующих измерителей, количество которых определяется следующей зависимостью:

$$N = 1 + 2v,$$

где N – необходимое количество измерителей в мажоритарной схеме для реализуемости выполнения гипотезы v -кратного возникновения отказа.

На рис. 1. представлена компоновочная схема акселерометров для случая однократного парирования отказов.

Предложенная компоновка представляет собой избыточный измеритель векторной величины, в данном случае вектора ускорения. Под *избыточным векторным измерителем* понимается измеритель, состоящий из одностепенных измерителей, количество которых превышает минимальное число измерителей, необходимых для измерения вектора. Одной из основных характеристик такого измерителя является избыточность, определяемая следующей зависимостью:

$$m = N - N_0,$$

где N – общее число измерителей; N_0 – минимальное число измерителей для измерения векторной величины (для рассматриваемого случая $N_0=3$).

В общем случае минимальное число векторов, образующих измерительный базис в трехмерном пространстве, равно трем. Таким образом, для измерения векторной величины в не избыточном варианте, необходимо реализовать измерительный базис, образуемый системой трех векторов, связанных с осями чувствительности измерителей. Три одностепенных измерителя, оси чувствительности которых неколлинеарные и не имеют трех компланарных осей чувствительности, образуют вектор-

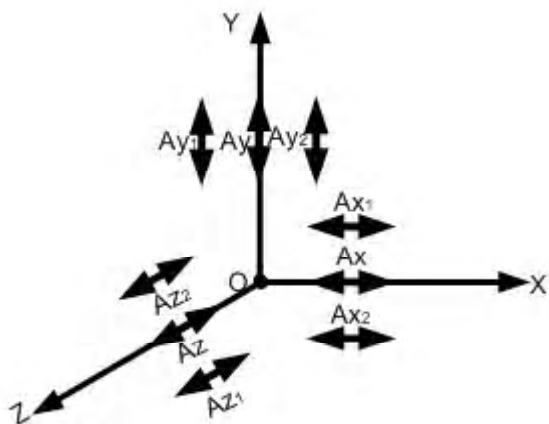


Рис. 1. Компоновочная схема акселерометров при трехкратном резервировании измерителей параметров движения

ный измеритель. При резервировании измерителей (рис. 1) отдельные группы измерителей имеют коллинеарное направление осей чувствительности, поэтому векторы, связанные с этими осями чувствительности, являются линейно зависимыми. Таким образом, несколько резервированных в одном направлении измерителей не могут входить в избыточный векторный измеритель. Число избыточных векторных измерителей, которые можно сформировать в этом случае, определяется сле-

дующей зависимостью: $N_p = \prod_{i=1}^{N_0} P_i$, где P_i – число резер-

вированных измерителей в одном направлении.

Так как для рассматриваемого случая (рис. 1) кратность резервирования в каждом направлении одинакова, то число избыточных векторных измерителей можно опреде-

лить из следующей зависимости: $N_p = N_0^{N/N_0} = 3^{9/3} = 27$.

При условии, что все оси чувствительности N датчиков ориентированы таким образом, что совпадающие с этими осями единичные векторы неколлинеарные, то число избыточных векторных измерителей, которые можно сформировать в этом случае, определяется по следующей зави-

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

Таким образом, исследования показывают, 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 избыточного векторного измерителя исправным, либо возможностью формирования наибольшего числа избыточных 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 измерительных базисов, соответствующее четырехкратному резервированию ($N_p = N_0^{N/N_0} = 3^{12/3} = 81$) при том же количестве измерителей.

Анализ результатов определения измерительных базисов так же указывает на тот факт, что увеличение числа измерительных базисов приводит к увеличению обрабатываемой информации, что, в свою очередь, приводит к не всегда оправданной дополнительной нагрузке вычислителя, а в некоторых случаях такая нагрузка вообще не допустима. Таким образом, необходимо сформировать условия, обеспечивающие выполнение предлагаемых критериев.

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО УСТОЙЧИВОГО БЛОКА ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ С МИНИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Рассмотрим случай трехмерного движения объекта. Несложно показать, что минимально необходимое количество измерителей должно определяться следующим тождеством:

$$N = n + 2, \tag{1}$$

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

Из условия (1) следует, что минимально необходимое количество акселерометров $N = 5$. В серии статей [11–13] показано, что не выполнение условия (1) позволяет формировать компоновки, позволяющие помимо выполнения основных функций решать задачи определения момента времени возникновения отказа, а также частично снимать неопределенность, связанную с местом, классом и видом отказа.

Для обеспечения полной диагностируемости отказов необходимо выполнение условия по количеству измерителей, а также необходимо для дополнительных и основных измерителей сформировать требования по их расположению.

Рассмотрим вариант произвольной компоновки пяти акселерометров. Для случая пяти датчиков линейных ускорений, пренебрегая произведениями $\omega_x \omega_y, \omega_x \omega_z, \omega_y \omega_z$, получена система уравнений, описывающая значения напряжений на выходе соответствующих измерителей:

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

$$\begin{aligned} \tilde{U}_2(t) = & a_x(t) \cos \alpha_2 + a_y(t) \cos \beta_2 + a_z(t) \cos \gamma_2 - \\ & -R_2 \left[\left\{ \omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_2 + \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_2 + \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_2 \right\} \right]; \tag{3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_3(t) = & a_x(t) \cos \alpha_3 + a_y(t) \cos \beta_3 + a_z(t) \cos \gamma_3 - \\ & -R_3 \left[\left\{ \omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_3 + \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_3 + \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_3 \right\} \right]; \tag{4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_4(t) = & a_x(t) \cos \alpha_4 + a_y(t) \cos \beta_4 + a_z(t) \cos \gamma_4 - \\ & -R_4 \left[\left\{ \omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_4 + \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_4 + \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_4 \right\} \right]; \tag{5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_5(t) = & a_x(t) \cos \alpha_5 + a_y(t) \cos \beta_5 + a_z(t) \cos \gamma_5 - \\ & -R_5 \left[\left\{ \omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_5 + \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_5 + \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_5 \right\} \right]; \tag{6} \end{aligned}$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = \overline{1,5}$ – углы, определяющие расположения оси чувствительности соответствующего акселерометра относительно осей измерительной системы координат; $R_i, i = \overline{1,5}$ – расстояние от начала координат до соответствующего акселерометра $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ – проекции кажущихся ускорений на оси чувствительности акселерометров; $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$ – проекции вектора угловой скорости вращения на соответствующие оси измерительной системы координат.

В векторно-матричном виде полученная система уравнений (2)–(6), примет вид:

$$U(t) = C\bar{A}(t) - R\Omega(t), \tag{7}$$

где $U(t) = [U_1(t) \ U_2(t) \ U_3(t) \ U_4(t) \ U_5(t)]^T$ – вектор напряжений на выходах акселерометров;

$$C = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \\ \cos \alpha_4 & \cos \beta_4 & \cos \gamma_4 \\ \cos \alpha_5 & \cos \beta_5 & \cos \gamma_5 \end{bmatrix} \text{ – матрица направляющих}$$

косинусов, определяющих положения осей чувствительности соответствующих акселерометров;

$\bar{A}(t) = [a_x(t) \ a_y(t) \ a_z(t)]^T$ – вектор измеряемого ус-

$$\text{корения; } R = \begin{bmatrix} R_1 \sin^2 \alpha_1 & R_1 \sin^2 \beta_1 & R_1 \sin^2 \gamma_1 \\ R_2 \sin^2 \alpha_2 & R_2 \sin^2 \beta_2 & R_2 \sin^2 \gamma_2 \\ R_3 \sin^2 \alpha_3 & R_3 \sin^2 \beta_3 & R_3 \sin^2 \gamma_3 \\ R_4 \sin^2 \alpha_4 & R_4 \sin^2 \beta_4 & R_4 \sin^2 \gamma_4 \\ R_5 \sin^2 \alpha_5 & R_5 \sin^2 \beta_5 & R_5 \sin^2 \gamma_5 \end{bmatrix} \text{ –}$$

матрица, характеризующая расположение акселерометра относительно начала координат базовой системы коор-

динат; $\Omega(t) = [\omega_x^2(t) \ \omega_y^2(t) \ \omega_z^2(t)]^T$ – вектор-столбец, характеризующий влияние угловых скоростей на показания акселерометров.

Выполним декомпозицию системы уравнений (7) на две подсистемы:

$$U'(t) = C'A(t) - R'\Omega(t); U'(t) = [U_1(t) \ U_2(t) \ U_3(t)]^T; \tag{8}$$

$$U''(t) = C''A(t) - R''\Omega(t); U''(t) = [U_4(t) \ U_5(t)]^T, \tag{9}$$

где

$$C' = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{bmatrix}; C'' = \begin{bmatrix} \cos \alpha_4 & \cos \beta_4 & \cos \gamma_4 \\ \cos \alpha_5 & \cos \beta_5 & \cos \gamma_5 \end{bmatrix} \text{ –}$$

матрицы направляющих косинусов усеченных систем;

$$R' = \begin{bmatrix} R_1 \sin^2 \alpha_1 & R_1 \sin^2 \beta_1 & R_1 \sin^2 \gamma_1 \\ R_2 \sin^2 \alpha_2 & R_2 \sin^2 \beta_2 & R_2 \sin^2 \gamma_2 \\ R_3 \sin^2 \alpha_3 & R_3 \sin^2 \beta_3 & R_3 \sin^2 \gamma_3 \end{bmatrix};$$

$$R'' = \begin{bmatrix} R_4 \sin^2 \alpha_4 & R_4 \sin^2 \beta_4 & R_4 \sin^2 \gamma_4 \\ R_5 \sin^2 \alpha_5 & R_5 \sin^2 \beta_5 & R_5 \sin^2 \gamma_5 \end{bmatrix} - \text{матри-$$

цы, характеризующие расположение акселерометров относительно начала координат базовой системы координат.

Выполнив ряд преобразований с (7), получим:

$$A_i(t) = U_i(t) + R_i \left[\omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_i + \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_i + \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_i \right], \quad (10)$$

где $A_i(t) = a_x(t) \cos \alpha_i + a_y(t) \cos \beta_i + a_z(t) \cos \gamma_i; i = \overline{1,5}$.

В результате преобразования системы (9), получено:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_4(t) = & \frac{1}{D} (D_x(t) \cos \alpha_4 + D_y(t) \cos \beta_4 + D_z(t) \cos \gamma_4) - \\ & - R_4 \left[\omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_4 + \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_4 + \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_4 \right], \quad (11) \end{aligned}$$

где

$$D = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix};$$

$$D_x(t) = \begin{vmatrix} A_1(t) & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ A_2(t) & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ A_3(t) & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix};$$

$$D_y = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & A_1(t) & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & A_2(t) & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & A_3(t) & \cos \gamma_3 \end{vmatrix};$$

$$D_z = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & A_1(t) \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & A_2(t) \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & A_3(t) \end{vmatrix}.$$

Первое слагаемое уравнения (11) представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} D_x(t) \cos \alpha_4 + D_y(t) \cos \beta_4 + D_z(t) \cos \gamma_4 = \\ = A_1(t) B_1 + A_2(t) B_2 + A_3(t) B_3, \quad (12) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} B_1 = & \cos \alpha_4 (\cos \beta_2 \cos \gamma_3 - \cos \beta_3 \cos \gamma_2) + \cos \beta_4 \times \\ & \times (\cos \alpha_3 \cos \gamma_2 - \cos \alpha_2 \cos \gamma_3) + \\ & + \cos \gamma_4 (\cos \alpha_2 \cos \beta_3 - \cos \beta_2 \cos \alpha_3); \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_2 = & \cos \alpha_4 (\cos \gamma_1 \cos \beta_3 - \cos \beta_1 \cos \gamma_3) + \cos \beta_4 \times \\ & \times (\cos \alpha_1 \cos \gamma_3 - \cos \gamma_1 \cos \alpha_3) + \\ & + \cos \gamma_4 (\cos \alpha_2 \cos \beta_3 - \cos \beta_2 \cos \alpha_3); \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_3 = & \cos \alpha_4 (\cos \beta_1 \cos \gamma_2 - \cos \beta_2 \cos \gamma_1) + \cos \beta_4 \times \\ & \times (\cos \alpha_2 \cos \gamma_1 - \cos \alpha_1 \cos \gamma_2) + \\ & + \cos \gamma_4 (\cos \alpha_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \cos \alpha_2). \quad (15) \end{aligned}$$

С использованием выражения (13)–(15) уравнение (11) примет вид:

$$\tilde{U}_4(t) = \frac{1}{D} \{ U_1(t) B_1 + U_2(t) B_2 + U_3(t) B_3 +$$

$$\begin{aligned} & + \omega_x^2(t) [R_1 B_1 \sin^2 \alpha_1 + B_2 R_2 \sin^2 \alpha_2 + B_3 R_3 \sin^2 \alpha_3] + \\ & + \omega_y^2(t) [B_1 R_1 \sin^2 \beta_1 + B_2 R_2 \sin^2 \beta_2 + B_3 R_3 \sin^2 \beta_3] + \\ & + \omega_z^2(t) [B_1 R_1 \sin^2 \gamma_1 + B_2 R_2 \sin^2 \gamma_2 + B_3 R_3 \sin^2 \gamma_3] \} + \\ & + R_4 [\omega_x^2(t) \sin^2 \alpha_4 - \omega_y^2(t) \sin^2 \beta_4 - \omega_z^2(t) \sin^2 \gamma_4]. \quad (16) \end{aligned}$$

$$\tilde{U}_4(t) = \frac{B_1}{D} U_1(t) + \frac{B_2}{D} U_2(t) + \frac{B_3}{D} U_3(t) +$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\omega_x^2(t)}{D} [R_1 B_1 \sin^2 \alpha_1 + R_2 B_2 \sin^2 \alpha_2 + B_3 R_3 \sin^2 \alpha_3 - D R_4 \sin^2 \alpha_4] + \\ & + \frac{\omega_y^2(t)}{D} [B_1 R_1 \sin^2 \beta_1 + B_2 R_2 \sin^2 \beta_2 + B_3 R_3 \sin^2 \beta_3 - D R_4 \sin^2 \beta_4] + \\ & + \frac{\omega_z^2(t)}{D} [B_1 R_1 \sin^2 \gamma_1 + B_2 R_2 \sin^2 \gamma_2 + B_3 R_3 \sin^2 \gamma_3 - D R_4 \sin^2 \gamma_4]. \quad (17) \end{aligned}$$

$$\tilde{U}_5(t) = \frac{C_1}{D} U_1(t) + \frac{C_2}{D} U_2(t) + \frac{C_3}{D} U_3(t) +$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\omega_x^2(t)}{D} [C_1 R_1 \sin^2 \alpha_1 + C_2 R_2 \sin^2 \alpha_2 + C_3 R_3 \sin^2 \alpha_3 - D R_5 \sin^2 \alpha_5] + \\ & + \frac{\omega_y^2(t)}{D} [C_1 R_1 \sin^2 \beta_1 + C_2 R_2 \sin^2 \beta_2 + C_3 R_3 \sin^2 \beta_3 - D R_5 \sin^2 \beta_5] + \\ & + \frac{\omega_z^2(t)}{D} [C_1 R_1 \sin^2 \gamma_1 + C_2 R_2 \sin^2 \gamma_2 + C_3 R_3 \sin^2 \gamma_3 - D R_5 \sin^2 \gamma_5]. \quad (18) \end{aligned}$$

где

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

Полученные аналитические зависимости позволяют сформировать условия полной структурной диагностируемости блока акселерометров без привлечения дополнительных внешних датчиков:

$$\begin{aligned} B_1 R_1 \sin^2 \alpha_1 + B_2 R_2 \sin^2 \alpha_2 + B_3 R_3 \sin^2 \alpha_3 &= DR_4 \sin^2 \alpha_4; \\ B_1 R_1 \sin^2 \beta_1 + B_2 R_2 \sin^2 \beta_2 + B_3 R_3 \sin^2 \beta_3 &= DR_4 \sin^2 \beta_4; \\ B_1 R_1 \sin^2 \gamma_1 + B_2 R_2 \sin^2 \gamma_2 + B_3 R_3 \sin^2 \gamma_3 &= DR_4 \sin^2 \gamma_4; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} C_1 R_1 \sin^2 \alpha_1 + C_2 R_2 \sin^2 \alpha_2 + C_3 R_3 \sin^2 \alpha_3 &= DR_5 \sin^2 \alpha_5; \\ C_1 R_1 \sin^2 \beta_1 + C_2 R_2 \sin^2 \beta_2 + C_3 R_3 \sin^2 \beta_3 &= DR_5 \sin^2 \beta_5; \\ C_1 R_1 \sin^2 \gamma_1 + C_2 R_2 \sin^2 \gamma_2 + C_3 R_3 \sin^2 \gamma_3 &= DR_5 \sin^2 \gamma_5; \end{aligned} \quad (20)$$

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать требования к формированию измерительного блока, позволяющего обеспечить его диагностирование с глубиной до вида отказа:

1. Минимально необходимое количество измерителей должно определяться следующим тождеством: $N = n + 2$, где n – количество степеней свободы по измеряемому параметру; N – минимально необходимое количество измерителей, обеспечивающих глубокое диагностирование при n степенях свободы.

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 (матрица направляющих косинусов).

3. Располагать i -е дополнительные датчики необходимо таким образом, чтобы выполнялись условия (19)–(20).

Выполнение полученных условий позволяет сформировать множество вариантов расположения акселерометров, обеспечивающих полную диагностируемость блока измерителей с глубиной до вида отказа. Выбор варианта из сформированного множества определяется удобством применения того или иного способа или другими дополнительными ограничениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили определить аналитическую зависимость, определяющую минимально необходимое количество чувствительных элементов в избыточном измерителе. Кроме того, были определены критерии, выполнение которых обеспечивает функциональную устойчивость при однократном полном отказе одного из чувствительных элементов избыточного измерителя на уровне классической мажоритарной схемы. Отметим, что относительно одной оси мажоритарная схема позволяет парировать только однократный отказ, причем не осуществляется классификация возникшего отказа на отказы и дефекты (в некоторой литературе дефекты называют частичными отказами), что не позволяет в полной мере использовать заложенную структурную избыточность мажоритарной схемы. Недостаток использования функционально устойчивого измерительного блока с минимальной структурной избыточностью заключается в том, что в таком измерителе осуществля-

ется парирование одного полного отказа независимо от отказавшего, а неоспоримым преимуществом такого измерителя является тот факт, что применением определенных алгоритмических схем обеспечивается компенсация многократных частичных отказов чувствительных элементов, при условии, что эти отказы возникают не более, чем в двух чувствительных элементах. Для устранения недостатка парирования только одного полного отказа в избыточном измерителе, необходимо введение дополнительной структурной избыточности. Для выполнения условия парирования многократных отказов зависимость, определяющая необходимое количество чувствительных элементов, примет следующий вид:

$$N = n + 2k, \quad (21)$$

где k – кратность возникающих полных отказов чувствительных элементов.

Для мажоритарной схемы зависимость (21) будет иметь следующий вид:

$$N = n + 6k. \quad (22)$$

Для случая возникновения только внезапных отказов зависимость (21) преобразуется в следующее равенство:

$$N = n + k. \quad (23)$$

Второе условие не зависит от количества измерителей в измерительном базисе, а его выполнение определяется только расположением осей чувствительности измерителей в блоке. Нетрудно показать, например, для случая трехкратного возникновения отказов для избыточного измерителя ускорения без учета влияния на показания акселерометров вращения, один из вариантов приемлемого расположения чувствительных элементов – это вариант расположения акселерометров по поверхности конуса. Если условия расположения акселерометров таковы, что необходимо учитывать влияние вращения, то исходя из второго условия и требований к обеспечению функциональной устойчивости к определенной кратности полных отказов, определяется такое расположение избыточного числа измерителей в блоке, которое обеспечивает выполнение необходимого условия обеспечения функциональной устойчивости.

Таким образом, в результате проведенного исследования предложены аналитические средства для определения количества избыточных измерителей и описания их расположения в блоке. Применение этих средств позволило сформировать избыточные конструкции измерителей, удовлетворяющие критериям сигнальной и структурной диагностируемости и позволяющие восстанавливать измерения в реальном масштабе времени в нештатных ситуациях, вызванных видами отказов измерителей.

Также определены критерии, выполнение которых обеспечивает функциональную устойчивость при однократном полном отказе одного из чувствительных элементов избыточного измерителя на уровне классической мажоритарной схемы.

Сформулированы условия, выполнение которых обеспечивает парирование многократных полных и частичных отказов в измерительном блоке.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Пчелинцев, Л. А.* Метод контроля измерительных трактов систем управления движением космических летательных аппаратов [Текст] / Л. А. Пчелинцев, И. И. Кузнецов, А. С. Ершов // Двойн. технол. – 2005. – № 1. – С. 13–15.
2. *Лебедев, Д. В.* Навигация и управление ориентацией малых космических аппаратов [Текст] / Д. В. Лебедев, А. Н. Ткаченко. – К. : Наукова думка, 2006. – 298 с.
3. Проектирование и экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст]: учебник в 3 т / Ю. С. Алексеев, Е. В. Белоус, Г. В. Беляев и др. / под общей ред. Ю. С. Алексеева, Ю. М. Златкина, В. С. Кривцова, А. С. Кулика, В. И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», НПП Хартрон-Аркос, 2012. – 680 с.
4. *Фирсов, С. Н.* Аналитический метод определения параметров управления системы ориентации космического аппарата [Текст] / С. Н. Фирсов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 4 (91). – С. 55–59.
5. *Firsov, S.* Fail-активне pneumatic servo driver of unmanned aircraft [Text] / S. Firsov, O. Pischuchina // Proceedings east west fuzzy colloquium 2006 13th Zittau Fuzzy colloquium. – IP : PAM, 2006. – P. 362–369.
6. *Дыбская, И. Ю.* Робастное управление дозирующим элементом газотурбинного двигателя ЛА на основе динамического компенсатора возмущения / И. Ю. Дыбская, С. Н. Фирсов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – Вып. 2 (38). – С. 20–24.
7. *Кулик, А. С.* Применение нечеткой логики в управлении беспилотными летательными аппаратами [Текст] / А. С. Кулик, С. Н. Фирсов, О. Э. Копысов // Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Перспективні комп'ютерні системи управління та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Харків : ХАЖД. – 2010 – С. 52–53.
8. *Фирсов, С. М.* Особенности конструкции та системи автоматичного керування безпілотного літального апарату нетрадиційної аеродинамічної схеми вертикального зльоту та посадки [Текст] / С. М. Фирсов, Туан Куок До, Р. М. Гуш, О. В. Данченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК». – Х. : ХНТУСГ, 2009. – Вип. 87. – С. 123–125.
9. *Васильев, В. И.* Алгоритмы обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД [Текст] / В. И. Васильев, И. И. Идрисов // Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий : сб. науч. тр. – Уфа : Гилем, 2008. – С. 185–190.
10. *Ефанов, В. Н.* Параметрический синтез отказоустойчивых алгоритмов управления в условиях неопределенности [Текст] / В. Н. Ефанов, Т. Р. Суяргулов // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 2. – С. 118–135.
11. *Кулик, А. С.* Восстановление измерений навигационной системы в режиме реального времени [Текст] / А. С. Кулик, С. Н. Фирсов, До Куок Туан, О. Ю. Златкин // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-тет, 2008. – Вып. 5 (59). – С. 28–33.
12. *Фирсов, С. Н.* Обеспечение глубокого диагностирования блока акселерометров при плоскостном движении летательного аппарата [Текст] / С. Н. Фирсов, Туан Куок До // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – Вып. 3 (60). – С. 33–38.
13. *Фирсов, С. Н.* Диагностируемость блока акселерометров при пространственном движении летательного аппарата [Текст] / С. Н. Фирсов, До Куок Туан // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – Вып. 4 (61). – С. 14–20.

Стаття надійшла до редакції 15.01.2013.

Фирсов С. М.

Канд. техн. наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ РУХУ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОРІЄНТАЦІЇ

Отримано аналітичні залежності, що визначають мінімально необхідну кількість чутливих елементів у надмірному вимірювачі. Сформовані критерії, виконання яких забезпечує функціональну стійкість при однократній повній відмові одного з чутливих елементів. Показані обмеження та переваги використання функціонально стійкого вимірювального блоку з мінімальною структурною надмірністю.

Ключові слова: супутникова система стабілізації та орієнтації, функціональна стійкість; вимірювальний блок, акселерометр, датчик кутових швидкостей, відмова.

Firsov S. N.

Phd, associated, professor, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Ukraine

PROVIDING OF FUNCTIONAL STABILITY OF MEASURING UNIT OF STABILIZATION AND ORIENTATION SATELLITE SYSTEM MOVEMENT PARAMETERS

The analytical tools for the number of the redundant measurers and their layout in the unit definition are suggested as a result of the research. The criteria, execution of which provides the functional stability in situation of a measurer's single complete failure at the classical majority circuit level, are defined. Relatively to a single axis the majority circuit allows to counteract a single failure only. The failure is not classified as a fault or a defect. This fact does not enable to use the designed-in structure redundancy of the majority circuit in full measure. The disadvantage of the functionally stable measuring unit with a minimal structural redundancy usage is that such type of the device enables to counteract only a single complete failure, no matter which one of its measurers has failed. Its irrefutable advantage is that the usage of certain algorithms provides the counteraction of the sensitive elements' multiple partial failures if the failures appear in no more than two sensitive elements. It is necessary to insert the additional structural redundancy in order to dispose the disadvantage of a single complete failure counteraction in the redundant measurer. The application of these tools makes possible to form the measurers' redundant constructions, satisfying the signal and structural diagnosability criteria and enabling the opportunity to revitalize the measurements in contingency, caused by the kinds of the failures, in real time. The criteria, satisfaction of which provides the functional

stability in conditions of the redundant measuring unit's sensitive element single complete failure at the classical majority circuit level, are formed. The conditions providing the counteraction of the multiple partial and complete failures are formulated.

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

REFERENCES

1. Pchelincev L.A., Kuznecov I. I., Ershov A. S. Metod kontrolja izmeritel'nyh traktov sistem upravljenja dvizheniem kosmicheskikh letatel'nyh apparatov [Tekst], *Dvojn. teh-nol.*, 2005, No. 1, pp. 13–15.
2. Lebedev D. V., Tkachenko A. N. Navigacija i upravljenje orientaciej malyh kosmicheskikh apparatov [Tekst]. Kiev, Naukova dumka, 2006, 298 p.
3. Alekseev Ju. S., Belous E. V., Beljaev G. V., Bojko V. P., Guslistaja E. P., Demidov E. N., Emel'janov V. I., Zlatkin O. Ju., Zlatkin Ju. M., Ivanov V. I., Kozuhov V. D., Kovalev S. A., Korshunov N. A., Kravec L. P., Krivcov V. S., Kuznecov Ju. A., Kulik A. S., Labazov O. A., Luk'janovich A. E., Lysenko A. A., Mangushina L. V., Mehovskoj N. F., Okunev V. V., Olejnik V. V., Olejnik S. V., Ostapenko V. M., Poltavskaja V. N., Serbin A. V., Sereda E. P., Stoljar A. A., Strap'jan L. N., Sumcov A. A., Fotin V. I., Hristij A. V., Chumachenko A. V., Chumachenko V. I., Jurchenko Ju. B., pod obshej red. Alekseeva Ju. S., Zlatkina Ju. M., Krivcova V. S., Kulika A. S., Chumachenko V. I. Proektirovanie i jeksperimental'naja otrabotka sistem upravljenja ob'ektov raketno-kosmicheskoi tehniki. T. 2. Proektirovanie sistem upravljenja kosmicheskikh apparatov i modulej orbital'nyh stancij [Tekst]: uchebnik v 3 t. Harkiv, Nac. ajerokosm. un-t im. N.E. Zhukovskogo «Har'k. aviac. in-t», NPP Hartron-Arkos, 2012, 680 p.
4. Firsov S.N. Analiticheskij metod opredelenija parametrov upravljenja sistemy orientacii kosmicheskogo apparata [Tekst], *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2012, No. 4 (91), pp. 55–59.
5. Firsov S., Pischuchina O. Fail-aktivne pneumatic servo driver of unmanned aircraft [Text]. *Proceedings east west fuzzy colloquium 2006 13th Zittau Fuzzy colloquium*, IP: PAM, 2006, pp. 362–369.
6. Dybskaja I. Ju., Firsov S. N. Robastnoe upravljenje dozirujushhim jelementom gazoturbinnogo dvigatelja LA na osnove dinamicheskogo kompensatora vozmushhenija, *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2007, Vyp. 2 (38), pp. 20–24.
7. Kulik A. S., Firsov S. N., Kopysov O. Je. Primenenie nechetkoj logiki v upravlenii bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Tekst], *Materiali Mizhnar. nauk.-tehn. konf. «Perspektivnye komp'juternye upravljajushhie i telekommunikacionnye sistemy dlja zheleznodorozhnogo transporta Ukrainy»*. Harkiv, HAZhD, 2010, pp. 52–53.
8. Firsov S. M., Tuan Kuok Do, Gush R. M., Danchenko O. V. Osoblivosti konstrukcii ta sistemi avtomatichnogo keruvannja bezpilotnogo lital'nogo aparatu netradicijnoi aerodinamichnoi shemi vertikal'nogo zl'otu ta posadki [Tekst], *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka «Problemi energozabespechennja ta energozberezhennja v APK»*, Harkiv, HNTUSG, 2009, Vip. 87, pp. 123–125.
9. Vasil'ev V. I., Idrisov I. I. Algoritmy obespechenija otkazoustojchivosti SAU GTD [Tekst], *Problemy mashinovedenija, processov upravljenja i kriticheskikh tehnologij: sb. nauch. tr.*, Ufa, Gilem, 2008, pp. 185–190.
10. Efanov V. N., Sujargulov T. R. Parametricheskij sintez otkazoustojchivyh algoritmov upravljenja v uslovijah neopredelennosti [Tekst], *Avtomatika i telemehanika*, 2000, No. 2, pp. 118–135.
11. Kulik A.S., Firsov S. N., Tuan Kuok Do, Zlatkin O. Ju. Vosstanovlenie izmerenij navigacionnoj sistemy v rezhime real'nogo vremeni [Tekst], *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, Har'kov, Nac. ajerokosm. un-tet, 2008, Vyp. 5 (59), pp. 28–33.
12. Firsov S. N., Tuan Kuok Do. Obespechenie glubokogo diagnostirovanija bloka akselerometrov pri ploskostnom dvizhenii letatel'nogo apparata [Tekst], *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, 2009, Vyp. 3 (60), pp. 33–38.
13. Firsov S. N. Tuan Kuok Do. Diagnostiruemost' bloka akselerometrov pri prostranstvennom dvizhenii letatel'nogo apparata [Tekst], *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, 2009, Vyp. 4 (61), pp. 14–20.