

УДК 681.5.09

А.С. КУЛИК, С.Н. ФИРСОВ, А.Н. ТАРАН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАХОВИЧНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ МИКРОСПУТНИКА

*В статье рассмотрено использование сигнально-параметрического подхода для диагностирования функционального состояния электромаховичной системы ориентации углового положения микро-спутника. Рассмотрены виды отказов, приводящие к изменению статических и динамических свойств исполнительных органов, датчиков обратной связи и объекта управления. Предложено использование методов диагностирования для оценки влияния внешних возмущающих моментов на исполнительные органы и корпус космического аппарата. Получены условия различимости и множество косвенных признаков, обеспечивающие глубину диагностирования до вида отказа.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, управление, ориентация, двигатель-маховик, датчик угловой скорости, отказ, диагностирование, сигнально-параметрический подход

### Введение

Анализ развития отечественной и зарубежной космической техники в течение последнего десятилетия позволяет сделать вывод о необходимости увеличения сроков активного существования малых космических аппаратов (КА). Одним и наиболее перспективных путей достижения заданной цели является создание отказоустойчивой бортовой аппаратуры КА [1,2]. Широко используемыми исполнительными органами в системах ориентации углового положения космических аппаратов (КА) являются двигатели-маховики (ДМ). Это обусловлено их простотой устройства и функционирования, значительными по величине вырабатываемыми управляющими моментами, а также возможностью восполнения энергетических затрат при помощи солнечных батарей [3, 4]. Для повышения отказоустойчивости подобных систем разрабатываются и внедряются различные избыточные конфигурации ДМ, позволяющие сохранить работоспособность системы при выходе из строя одного из исполнительных органов [4, 5]. При этом увеличение количества ДМ и расположение их неколлинеарно основным осям инерции КА приводит к появлению значительных перекрестных связей между каналами, усложняет алгоритмы управления и делает их более чувствительными к отклонению параметров элементов системы от номинальных. Для сохранения требуемого качества управления в случае изменения функциональных свойств элементов системы необходимо в режиме реального времени диагностировать функциональное

состояние системы, определять место, класс и вид отказа для его последующей компенсации с использованием имеющихся в наличии избыточностей.

### Выбор схемы расположения ДМ и подхода к диагностированию

Так как диагностирование функционального состояния предполагается осуществлять с целью дальнейшего восстановления работоспособности объекта, рассмотрим в работе систему, содержащую избыточное количество исполнительных органов (ИО). ДМ обладают существенными массогабаритными характеристиками, следовательно, целесообразно использовать СУ с минимальным количеством избыточных ДМ.

В [4] проведен анализ различных избыточных конфигураций ДМ и предложен альтернативный вариант, содержащий в себе четыре исполнительных органа, расположенных таким образом, чтобы векторы создаваемых ими кинетических моментов были направлены вдоль ребер правильной четырехугольной пирамиды. При этом альтернативная схема характеризуется минимальной дисперсией формирования вектора управляющего кинетического момента в случае выхода из строя одного из исполнительных органов.

В работе [2] проведен анализ сигнального и параметрического подходов к диагностированию технических систем и предлагается применение нового сигнально-параметрического подхода, который основывается на использовании в качестве диагности-

ческих признаков отклонений выходных сигналов системы, а также отклонений параметров отказов от номинальных. Построение алгоритмов диагностирования предлагается осуществлять на основании анализа функциональных и логических диагностических моделей, связывают прямые и косвенные признаки отказов. Полученные диагностические модели объединяются в иерархию, причем на нижнем уровне иерархии находятся модели определения видов отказа, а на верхнем – модели обнаружения отказа [2]. Сигнально-параметрический подход достаточно апробирован на различных объектах при их свободном движении [2, 6].

В статье предлагается провести анализ диагностируемости системы ориентации углового положения КА, определить множество возможных функциональных отказов элементов системы, получить диагностические модели для заданного множества отказов, определить минимальное количество косвенных диагностических признаков отказов и правила их обработки для определения места, класса и вида отказа, а также величин отклонения параметров системы от номинальных.

### Номинальный режим функционирования системы ориентации

Обобщенная функциональная схема системы ориентации углового положения КА представлена на рис. 1.

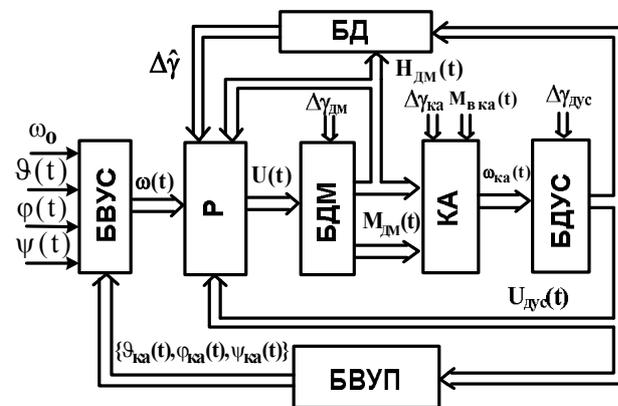


Рис. 1. Функциональная схема системы ориентации углового положения КА

Входными сигналами для системы являются величины углов Эйлера-Крылова ( $\vartheta, \varphi, \psi$ ), определяющие положение КА в орбитальной системе координат, а также орбитальная угловая скорость вращения КА  $\omega_0$ . В блоке вычисления угловых скоростей (БВУС) на основании текущего углового рассогласования рассчитываются требуемые значения угловых скоростей КА в связанной системе координат (ССК), поступающие в регулятор (Р). Блок двигателей маховиков (БДМ) вырабатывает управ-

ляющие моменты относительно центра масс КА. Блок датчиков угловых скоростей (БДУС) измеряет угловые скорости вращения КА в ССК и передает их в регулятор и блок вычисления углового положения (БВУП). Функциональные элементы системы подвержены влиянию отказов, приводящих к отклонению их параметров от номинальных ( $\Delta \gamma_{\text{дм}}, \Delta \gamma_{\text{ка}}, \Delta \gamma_{\text{дус}}$ ). Блок диагностирования (БД) на основании управляющих сигналов регулятора  $U(t)$ , а также выходных измеряемых сигналов производит оценку функционального состояния системы и, в случае обнаружения отказа, передает в регулятор оценочное значение прямых диагностических признаков  $\Delta \hat{\gamma}$ .

Схема установки исполнительных органов и датчиков на КА представлена на рис. 2.

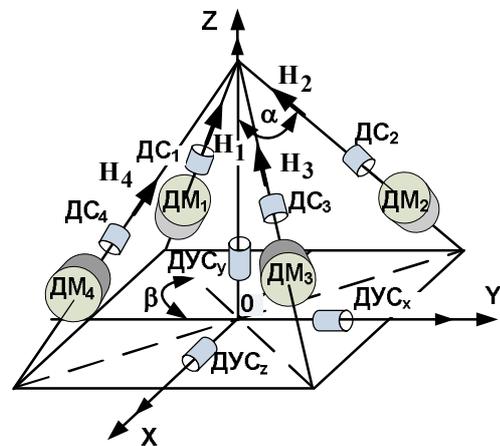


Рис. 2. Расположение ИО и датчиков относительно осей ССК КА

Электромаховичный ИО в свою очередь состоит из ДМ, усилителя мощности (УМ) и датчика скорости вращения (ДС) (рис. 3).

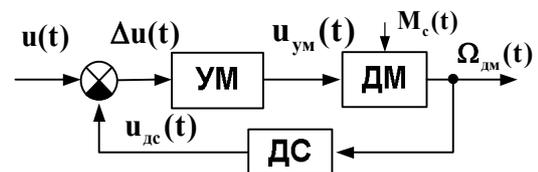


Рис. 3. Функциональная схема ИО

При математическом описании системы представим датчики скоростей вращения ДМ, усилители мощности и ДУС КА в виде безинерционных звеньев, характеризующихся лишь коэффициентами передачи, а ДМ - апериодическим звеном первого порядка. Так как все измерения в системе производятся в ССК, рассмотрим дифференциальные уравнения описывающие вращение КА с БДМ относительно основных осей инерции [1, 3]:

$$\begin{aligned}
J_{ка} \dot{\omega}_{ка}(t) &= M_B(t) - \dot{H}_{дм}(t) - \omega_{ка}(t) \times H_{дм}(t) - \\
&- \omega_{ка}(t) \times J_{ка} \omega_{ка}(t), H_{дм j}(t) = \sum_{i=1}^4 K_{ij} J_i \Omega_i(t), \\
T_i \dot{\Omega}_i(t) &= -\Omega_i(t)(1 + K_{ум i} K_{у i} K_{дс i}) - M_{с i}(t) + \\
&+ K_{ум i} K_{у i} u_i(t), K_{ij} = \cos(\alpha_{ij}), j \in \{x, y, z\}, i = \overline{1, 4}.
\end{aligned} \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $J_{ка}$  – матрица инерции КА с БДМ;  $\omega_{ка} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$  – вектор абсолютной угловой скорости вращения КА;  $H_{дм} = \{H_{дм x}, H_{дм y}, H_{дм z}\}$  – вектор кинетического момента, вырабатываемого БДМ;  $M_B = \{M_{Bx}, M_{By}, M_{Bz}\}$  – вектор суммарного момента внешних сил, действующих на КА;  $\Omega_i, J_i, T_i, K_{у i}, M_{с i}$  – соответственно угловая скорость вращения, осевой момент инерции, постоянная времени, коэффициент передачи по электродвижущему моменту и момент сопротивления вращению в ДМ  $i$ -го ИО;  $K_{ум i}$  – коэффициент передачи  $i$ -го УМ;  $K_{дс i}$  – коэффициент передачи  $i$ -го ДС;  $K_{ij}$  – коэффициент вклада  $i$ -го ДМ в управление вдоль  $j$ -й оси.

Для упрощения вывода последующих зависимостей примем матрицу инерции КА диагональной

$$J_{ка} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $I_x, I_y, I_z$  – осевые моменты инерции КА.

В результате линеаризации дифференциальных уравнений движения КА разложением в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки  $\omega_{ка0} = \{\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}\}$  и отбрасывания членов второго порядка малости, а также представления производных скоростей КА и ДМ с использованием метода Эйлера [6], получаем дискретное представление линеаризованных уравнений номинального движения КА с БДМ относительно центра масс:

$$\begin{aligned}
\Omega_i(k+1) &= \Omega_i(k) + \frac{T_0}{T_i} \times \\
&\times \left( \begin{aligned} &- \Omega_i(k)(1 + K_{ум i} K_{у i} K_{дс i}) + \\ &+ K_{ум i} K_{у i} u_i(k) - M_{с i}(k) \end{aligned} \right); \\
\omega_x(k+1) &= \omega_x(k) + \\
&+ \frac{T_0}{I_x} \left( \begin{aligned} &\left[ (I_y - I_z) \omega_{z0} - H_{z0} \right] \omega_y(k) + \\ &+ \left[ (I_y - I_z) \omega_{y0} + H_{y0} \right] \omega_z(k) + \omega_{z0} H_y(k) - \\ &- \omega_{y0} H_z(k) + M_{дм x}(k) + M_{Bx}(k) + \\ &+ H_{z0} \omega_{y0} - H_{y0} \omega_{z0} - (I_y - I_z) \omega_{y0} \omega_{z0} \end{aligned} \right);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\omega_y(k+1) &= \omega_y(k) + \frac{T_0}{I_y} \times \\
&\times \left( \begin{aligned} &\left[ (I_z - I_x) \omega_{z0} + H_{z0} \right] \omega_x(k) + \\ &+ \left[ (I_z - I_x) \omega_{x0} - H_{x0} \right] \omega_z(k) + \omega_{x0} H_z(k) - \\ &- \omega_{z0} H_x(k) + M_{дм y}(k) + M_{By}(k) + \\ &+ H_{x0} \omega_{z0} - H_{z0} \omega_{x0} - (I_z - I_x) \omega_{x0} \omega_{z0} \end{aligned} \right); \\
\omega_z(k+1) &= \omega_z(k) + \\
&+ \frac{T_0}{I_z} \left( \begin{aligned} &\left[ (I_x - I_y) \omega_{x0} + H_{x0} \right] \omega_y(k) + \\ &+ \left[ (I_x - I_y) \omega_{y0} - H_{y0} \right] \omega_x(k) + \omega_{y0} H_x(k) - \\ &- \omega_{x0} H_y(k) + M_{дм z}(k) + M_{Bz}(k) + \\ &+ H_{y0} \omega_{x0} - H_{x0} \omega_{y0} - (I_x - I_y) \omega_{y0} \omega_{x0} \end{aligned} \right); \\
H_{дм j}(k) &= \sum_{i=1}^4 \cos(\alpha_{ij}) J_i \Omega_i(k), \\
M_{дм j}(k) &= \\
&= - \sum_{i=1}^4 \cos(\alpha_{ij}) J_i \left( \begin{aligned} &\frac{-\Omega_i(k)(1 + K_{ум i} K_{у i} K_{дс i})}{T_i} + \\ &\frac{K_{ум i} K_{у i} u_i(k) - M_{с i}(k)}{T_i} \end{aligned} \right);
\end{aligned} \quad (3)$$

$$|u_i(k)| \leq u_{\max}, i = \overline{1, 4}, j \in \{x, y, z\}.$$

Уравнения (3) описывают номинальный режим функционирования системы ориентации углового положения КА в окрестности рабочей точки.

### Параметризация видов отказов функциональных элементов системы

Под видом отказа элемента системы будем понимать любое отклонение от его номинальной статической и динамической характеристики. Множество видов отказов  $D$  системы в целом включает в себя подмножества видов отказов ее элементов  $D = D_{БДМ} \cup D_{КА} \cup D_{ДУС}$ . Зададим множества видов отказов для каждого функционального элемента.

$$\begin{aligned}
D_{БДМ} &= \{D_{ио1}, \dots, D_{ио4}\}; \\
D_{ио i} &= \{D_{ум i}, D_{дм i}, D_{дс i}\}, \\
D_{ум i} &= \{d_{ум1}, \dots, d_{ум7}\}, D_{дм i} = \{d_{дм1}, \dots, d_{дм4}\}, \\
D_{дс i} &= \{d_{дс1}, \dots, d_{дс4}\}; D_{КА} = \{d_{ка1}, \dots, d_{ка8}\}; \\
D_{БДУС} &= \{D_{дус x}, D_{дус y}, D_{дус z}\},
\end{aligned} \quad (4)$$

$$D_{дус j} = \{d_{дус1}, d_{дус2}, d_{дус3}\}, i = \overline{1, 4}, j \in \{x, y, z\}.$$

Множество  $D_{ум i}$  видов отказов  $i$ -го УМ:  $d_{ум1}$  – уменьшение коэффициента передачи;  $d_{ум2}, d_{ум3}$  – положительный и отрицательный дрейф;  $d_{ум4}$  – пробой

положительного плеча;  $d_{ym5}$  – обрыв входного сигнального провода;  $d_{ym6}$  – пробой отрицательного плеча;  $d_{ym7}$  – КЗ выхода. Множество  $D_{dm_i}$  видов отказов  $i$ -го ДМ:  $d_{dm1}$  – уменьшение коэффициента передачи;  $d_{dm2}$  – увеличение момента сопротивления вращению;  $d_{dm3}$  – обрыв управляющего провода;  $d_{dm4}$  – увеличение постоянной времени. Множество  $D_{dc_i}$  видов отказов  $i$ -го ДС:  $d_{dc1}$  – уменьшение коэффициента передачи;  $d_{dc2}$ ,  $d_{dc3}$  – положительный и отрицательный дрейф,  $d_{dc4}$  – обрыв сигнального провода. Множество  $D_{ka}$  видов отказов КА:  $d_{ka1}$ ,  $d_{ka2}$  – увеличение и уменьшение  $I_x$ ;  $d_{ka3}$ ,  $d_{ka4}$  – увеличение и уменьшение  $I_y$ ;  $d_{ka5}$ ,  $d_{ka6}$  – увеличение и уменьшение  $I_z$ ;  $d_{ka7}$ ,  $d_{ka8}$  – смещение центра масс КА вправо и влево от оси ОХ. Множество  $D_{duc_j}$  видов отказов  $j$ -го ДУС:  $d_{duc1}$  – уменьшение коэффициента передачи;  $d_{duc2}$ ,  $d_{duc3}$  – положительный и отрицательный дрейф. Общее количество рассматриваемых видов отказов  $N_D = 77$ .

Рассматриваемые виды отказов можно объединить в соответствующие классы отказов (КО), характеризующиеся отклонением одного из параметров системы от номинального значения  $\gamma_q$ :

$$\tilde{\gamma}_q = \gamma_q + \Delta\gamma_q, q = 1, 2, \dots, N_\gamma, \quad (5)$$

где  $N_\gamma$  – общее количество параметров.

Например, для  $i$ -го УМ можно ввести два класса отказов (КО):

$$\begin{aligned} \alpha_{ym} &= \{\alpha_{ym1}, \alpha_{ym2}\}, \alpha_{ym1} : \tilde{K}_{ym1}, \\ \alpha_{ym1} &= \{d_{ym1}, d_{ym4}, d_{ym5}, d_{ym6}, d_{ym7}\}; \\ \alpha_{ym2} &: \tilde{u}_{ym0}, \alpha_{ym2} = \{d_{ym2}, d_{ym3}\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Множество прямых диагностических признаков КО имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{Y} &= \{\tilde{K}_{ym1}, \tilde{K}_{u1}, \tilde{K}_{dc1}, \tilde{M}_{c1}, \tilde{u}_{ym10}, \tilde{u}_{dc10}, \tilde{T}_1, \\ \dots, \tilde{K}_{ym4}, \tilde{K}_{u4}, \tilde{K}_{dc4}, \tilde{M}_{c4}, \tilde{u}_{ym40}, \tilde{u}_{dc40}, \tilde{T}_4, \\ \tilde{M}_{bx}, \tilde{K}_x, \tilde{u}_{ducx0}, \tilde{I}_x, \dots, \tilde{K}_z, \tilde{u}_{ducz0}, \tilde{I}_z\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Общее количество рассматриваемых классов отказов равняется  $N_\gamma = 38$ .

### Анализ и обеспечение диагностируемости системы

Определим переменные состояния, вектора управляющих, возмущающих и выходных сигналов:

$$x^T = [\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \omega_x, \omega_y, \omega_z],$$

$$u^T = [u_1, u_2, u_3, u_4],$$

$$f^T = [M_{c1}, M_{c2}, M_{c3}, M_{c4}, M_{bx}, M_{by}, M_{bz}], \quad (8)$$

$$y^T = [u_{dc1}, u_{dc2}, u_{dc3}, u_{dc4}, u_{ducx}, u_{ducy}, u_{ducz}].$$

Вектор внешних возмущающих моментов  $f$  не подлежит непосредственному измерению. Для дальнейшего использования методов сигнально параметрического подхода к диагностированию, представим рассматриваемые моменты в виде некоторых коэффициентов, умноженных на единичный входной сигнал:

$$\tilde{f}_i(t) = \tilde{K}_{fi} f_i(t), f_i(t) = 1(t), i = 1, 2, \dots, 7. \quad (9)$$

При этом номинальные значения коэффициентов и их отклонения будут равняться соответствующим величинам рассматриваемых моментов:

$$\Delta K_{fi} = \Delta f_i. \quad (10)$$

Уравнения состояния и выхода, описывающие возмущенный режим функционирования системы ориентации с учетом введенных обозначений и рассматриваемого множества видов отказов принимают вид:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1(k+1) &= (1 - \frac{T_0(1 + \tilde{K}_{ym1} \tilde{K}_{U1} \tilde{K}_{dc1})}{\tilde{T}_1}) \tilde{x}_1(k) + \\ &+ \frac{T_0 \tilde{K}_{ym1} \tilde{K}_{U1}}{\tilde{T}_1} u_1(k) - \frac{T_0 \tilde{K}_{fi} f_1(k)}{\tilde{T}_1} - \\ &- \frac{T_0 \tilde{K}_{ym1} \tilde{K}_{U1}}{\tilde{T}_1} \tilde{u}_{dc10} + \frac{T_0 \tilde{K}_{U1}}{\tilde{T}_1} \tilde{u}_{ym10}, \\ &\dots \\ \tilde{x}_7(k+1) &= \tilde{x}_7(k) - \\ &- \frac{T_0}{\tilde{I}_z} \sum_{i=1}^4 \tilde{x}_i(k) J_i \left( \frac{K_{ix} \omega_{y0} - K_{iy} \omega_{x0} - K_{iz}(1 + \tilde{K}_{ym1} \tilde{K}_{U1} \tilde{K}_{dc1})}{\tilde{T}_1} \right) - \\ &- \frac{T_0}{\tilde{I}_z} \sum_{i=1}^4 K_{iz} J_i \left( \frac{\tilde{K}_{ym1} \tilde{K}_{U1} u_i(k) - \tilde{K}_{fi} f_i(k)}{\tilde{T}_1} + \frac{\tilde{K}_{U1}}{\tilde{T}_1} \tilde{u}_{ym10} \right) + \\ &+ \frac{T_0((\tilde{I}_x - \tilde{I}_y) \omega_{y0} - H_{y0})}{\tilde{I}_z} \tilde{x}_5(k) + \\ &+ \frac{T_0((\tilde{I}_x - \tilde{I}_y) \omega_{x0} + H_{x0})}{\tilde{I}_z} \tilde{x}_6(k) + \frac{T_0}{\tilde{I}_z} \tilde{K}_{f7} f_7(k) + \\ &+ \frac{T_0}{\tilde{I}_z} (H_{y0} \omega_{x0} - H_{x0} \omega_{y0} - (\tilde{I}_x - \tilde{I}_y) \omega_{y0} \omega_{x0}) + \\ &+ \frac{T_0}{\tilde{I}_z} \sum_{i=1}^4 \frac{J_i K_{iz} \tilde{K}_{ym1} \tilde{K}_{U1}}{\tilde{T}_1} \tilde{u}_{dc10}, \\ \tilde{y}_1 &= \tilde{K}_{dc1} \tilde{x}_1 + \tilde{u}_{dc10}, \tilde{y}_2 = \tilde{K}_{dc2} \tilde{x}_2 + \tilde{u}_{dc20}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_3 &= \tilde{K}_{дс3} \tilde{x}_3 + \tilde{u}_{дс3,0}, \tilde{y}_4 = \tilde{K}_{дс4} \tilde{x}_4 + \tilde{u}_{дс4,0}, \\ \tilde{y}_5 &= \tilde{K}_x \tilde{x}_5 + \tilde{u}_{дус_x,0}, \tilde{y}_6 = \tilde{K}_x \tilde{x}_6 + \tilde{u}_{дус_y,0}, \\ \tilde{y}_7 &= \tilde{K}_z \tilde{x}_7 + \tilde{u}_{дус_z,0}. \end{aligned}$$

Из уравнений (11) получаем соответствующие матрицы для описания системы в векторно-матричной форме (12):  $\tilde{A}(\gamma)$  – состояния,  $\tilde{B}(\gamma)$  – управления,  $\tilde{F}(\gamma)$  – возмущения,  $\tilde{B}u_0(\gamma)$  – влияния дрейфов ИО,  $\tilde{A}_0(\gamma)$  – влияния рабочей точки на переменные состояния,  $\tilde{C}(\gamma)$  – наблюдения,  $\tilde{D}(\gamma)$  – обхода по управлению,  $\tilde{N}(\gamma)$  – обхода по возмущению,  $\tilde{C}_{д0}(\gamma)$  – дрейфа датчиков,  $\tilde{C}_0(\gamma)$  – влияния рабочей точки на измеряемые сигналы.

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= \tilde{A}(\gamma) \tilde{x}(k) + \tilde{B}(\gamma)u(k) + \\ &+ \tilde{F}(\gamma)f(k) + \tilde{B}u_0(\gamma) + \tilde{A}_0(\gamma); \\ y(k) &= \tilde{C}(\gamma)x(k) + \tilde{D}(\gamma)u(k) + \tilde{N}(\gamma)f(k) + \\ &+ \tilde{C}_{д0}(\gamma) + \tilde{C}_0(\gamma). \end{aligned} \quad (12)$$

Для обеспечения структурной диагностируемости относительно введенного множества классов отказов необходимо, чтобы составные матрицы  $P_{\gamma_i}$  были линейно независимыми во всех парных сочетаниях [5, 6].

$$P_{\gamma_q} = \begin{bmatrix} A_{\gamma_q} & B_{\gamma_q} & F_{\gamma_q} & Bu_{0\gamma_q} & A_{0\gamma_q} \\ C_{\gamma_q} & D_{\gamma_q} & N_{\gamma_q} & C_{д0\gamma_q} & C_{0\gamma_q} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$A_{\gamma_q} = \frac{\partial \tilde{A}(\gamma_q)}{\partial \gamma_q}, \dots, C_{0\gamma_q} = \frac{\partial \tilde{C}(\gamma_q)}{\partial \gamma_q},$$

$$P_{\gamma_i} \neq a \cdot P_{\gamma_j}; i, j, q = \overline{1..N_{\gamma}}, i \neq j$$

Анализ сочетаний составных матриц показывает, что отказы, связанные с отклонениями параметров УМ и ДМ одного ИО, структурно неразличимы. Для обеспечения их различимости необходимо введение дополнительной контрольной точки (КТ) между этими элементами (рис. 4).

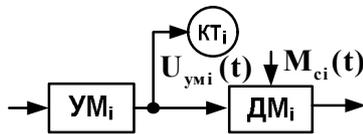


Рис. 4. Введение дополнительной КТ в систему

Условием полной диагностируемости системы является линейная независимость характеристических векторов  $\Psi_{\gamma_q}$  во всех парных сочетаниях.

$$\Psi_{\gamma_i} = P'_{\gamma_q} V + \Psi_{доп},$$

$$\Psi_{\gamma_i} \neq a \cdot \Psi_{\gamma_j}; i, j, q = \overline{1, 2, \dots, N_{\gamma}}, i \neq j,$$

$$P'_{\gamma_q} = \begin{bmatrix} A_{\gamma_q} & B_{\gamma_q} & F_{\gamma_q} \\ C_{\gamma_q} & D_{\gamma_q} & N_{\gamma_q} \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} x(k) \\ f(k) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\Psi_{доп} = \begin{bmatrix} Bu_{0\gamma_q} & A_{0\gamma_q} \\ C_{д0\gamma_q} & C_{0\gamma_q} \end{bmatrix}.$$

$$u(t) \neq 0, x(t) \neq const. \quad (15)$$

Анализ  $\Psi_{\gamma_q}$  показывает, что при выполнении условия (15), система полностью диагностируема относительно рассматриваемых классов отказов.

### Обнаружение и классификация отказов

Для объектов с известным входом, к которым относится рассматриваемая система, процедуру обнаружения и классификации отказов условно можно представить с помощью функциональной схемы приведенной на рис. 5.

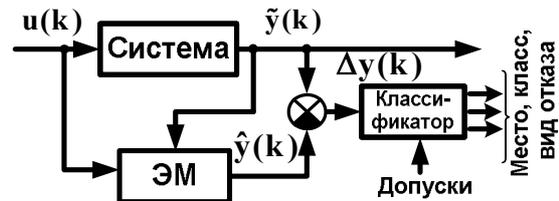


Рис. 5. Функциональная схема обнаружения и классификации отказов

По разностному сигналу  $\Delta y(k)$  между вектором измеряемых сигналов системы и выходом эталонной модели (ЭМ), производится классификационная обработка относительно заранее сформированных допусков. В качестве ЭМ для рассматриваемой системы можно использовать зависимость вида:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) + Ff(k) + A_0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k). \end{aligned} \quad (16)$$

Диагностические функциональные модели для случаев больших и малых отказов примут соответственно вид (17) и (18):

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A\Delta x(k) + \Delta A(\Delta\gamma_q)\tilde{x}(k) + \\ &+ \Delta B(\Delta\gamma_q)u(k) + \Delta F(\Delta\gamma_q)f(k) + \tilde{B}u_0(\Delta\gamma_q); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta y(k) &= \\ &= C\Delta x(k) + \Delta C(\Delta\gamma_q)\tilde{x}(k) + \tilde{C}_{д0}(\Delta\gamma_q). \\ \Delta A(\Delta\gamma_q) &= A_{\gamma_q}\Delta\gamma_q, \dots, \Delta C(\Delta\gamma_q) = C_{\gamma_q}\Delta\gamma_q; \\ \Delta x(k+1) &= A\Delta x(k) + \\ &+ \left( A_{\gamma_q}\tilde{x}(k) + B_{\gamma_q}u(k) + F_{\gamma_q}f(k) + Bu_{0\gamma_q} \right) \Delta\gamma_q; \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k) + (C_{\gamma_q}\tilde{x}(k) + C_{д0\gamma_q}) \Delta\gamma_q. \end{aligned} \quad (18)$$

Из (17, 18) можно получить функции чувствительности  $\varphi_q(k)$ , связывающие прямые и косвенные признаки отказов:

$$\Delta y_{\gamma_q}(k) = \varphi_q(\tilde{x}(k), x(k), u(k), f(k), \Delta \gamma_q). \quad (19)$$

Так функции чувствительности для малых отказов имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta y_{\gamma_q}(k) = & CA \Delta x(k-1) + \\ & + \Delta \gamma_q \left[ C \begin{pmatrix} A_{\gamma_q} \tilde{x}(k-1) + B_{\gamma_q} u(k-1) + \\ + F_{\gamma_q} f(k-1) + Bu_{0_{\gamma_q}} \end{pmatrix} + \right. \\ & \left. + C_{\gamma_q} \tilde{x}(k) + C_{d0_{\gamma_q}} \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

На основании известных допусков на диагностические параметры:  $\Delta \gamma_{qmin} \leq \Delta \gamma_q \leq \Delta \gamma_{qmax}$ , по функциям чувствительности определяется соответствующие допустимые диапазоны изменения составляющих вектора косвенных признаков

$$\Delta y_{v_{\gamma_q}}, v = \overline{1, N_y}:$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{v_{pos}} &= \min(D_{\Delta y_{v_{pos}}}); \Delta y_{v_{neg}} = \max(D_{\Delta y_{v_{neg}}}); \\ \Delta y_{v_{\gamma_{q\pm}}}(k) &\in D_{\Delta y_{v_{pos}}}, \text{ если } \Delta y_{v_{\gamma_{q\pm}}}(k) > 0; \\ \Delta y_{v_{\gamma_{q\pm}}}(k) &\in D_{\Delta y_{v_{neg}}}, \text{ если } \Delta y_{v_{\gamma_{q\pm}}}(k) < 0; \quad (21) \\ \Delta y_{v_{\gamma_{q+}}} &= \varphi_q(\tilde{x}(k), \dots, \Delta \gamma_{qmax}); \\ \Delta y_{v_{\gamma_{q-}}} &= \varphi_q(\tilde{x}(k), \dots, \Delta \gamma_{qmin}). \end{aligned}$$

Для определенных режимов функционирования системы допуски изменения косвенных диагностических признаков  $\Delta y_{v_{pos}}$  и  $\Delta y_{v_{neg}}$  могут быть рассчитаны заранее.

На первом уровне диагностического обеспечения устанавливается только факт появления отказа, соответственно при классификационной обработке используем предикатное уравнение:

$$\begin{aligned} z_0 &= \begin{cases} 0, \text{ если } \forall I_{v_{cp}} \in \Delta_I; \\ 1, \text{ если } \exists I_{v_{cp}} \notin \Delta_I, \end{cases} \\ I_{v_{cp}} &= \frac{\sum_{k=1}^N \Delta y_v(k)}{N}, \Delta_I = [\Delta y_{v_{neg}}, \Delta y_{v_{pos}}]. \quad (22) \end{aligned}$$

Если значение предиката  $z_0$  равно «1», значит, в системе произошел отказ, если равно «0», то он функционирует нормально (рис. 6).



Рис. 6. Фрагмент дихотомического дерева обнаружения отказа

Для построения алгоритмов поиска места и класса отказа перейдем к диагностическим логическим моделям, установив связь прямых признаков отказов  $\Delta \gamma_q$  с булевыми косвенными диагностическими признаками  $z_v$ , принимающими значения в соответствии с правилом (23).

$$z_v = \begin{cases} 1, \text{ если } |\Delta y_{v_{\gamma_q}}(k)| > 0; \\ 0, \text{ если } |\Delta y_{v_{\gamma_q}}(k)| = 0. \end{cases} \quad (23)$$

При построении алгоритмов классификации вводится допущение об однократности прямых признаков отказов [2, 6]. Это означает, что на интервале диагностирования только один параметр системы получает приращение  $\Delta \gamma_q$  относительно своего номинального значения.

Результат перехода представлен в табл. 1 и представляет собой TL модель системы для рассматриваемого множества классов отказов.

Таблица 1  
TL модель для множества классов отказов

| $\gamma_q$                       | Косвенные диагностические признаки |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | $z_1$                              | $z_2$ | $z_3$ | $z_4$ | $z_5$ | $z_6$ | $z_7$ |
| $\gamma_1' \dots \gamma_7$       | 1                                  | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     |
| $\gamma_8' \dots \gamma_{14}$    | 0                                  | 1     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     |
| $\gamma_{15}' \dots \gamma_{21}$ | 0                                  | 0     | 1     | 0     | 1     | 1     | 1     |
| $\gamma_{22}' \dots \gamma_{28}$ | 0                                  | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| $\gamma_{29}' \dots \gamma_{31}$ | 0                                  | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     |
| $\gamma_{32}$                    | 0                                  | 0     | 0     | 0     | 1     | 0(1)  | 0(1)  |
| $\gamma_{33}' \gamma_{34}$       | 0                                  | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     |
| $\gamma_{35}$                    | 0                                  | 0     | 0     | 0     | 0(1)  | 1     | 0(1)  |
| $\gamma_{36}' \gamma_{37}$       | 0                                  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     |
| $\gamma_{38}$                    | 0                                  | 0     | 0     | 0     | 0(1)  | 0(1)  | 1     |

Анализ таблицы показывает, что косвенные диагностические признаки  $z_v$  позволяют определить место возникновения отказа с точностью до номера ИО, а также оси ССК КА (рис. 7).

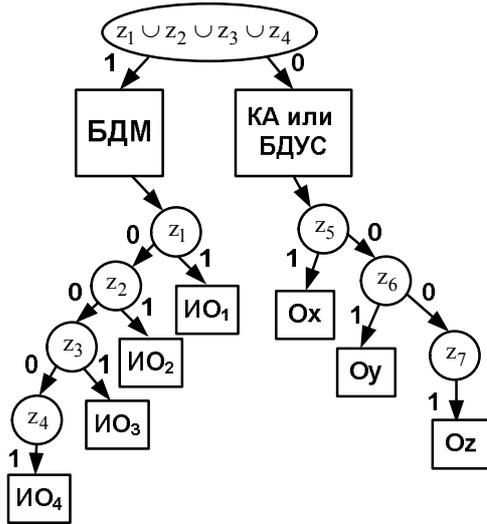


Рис. 7. Фрагмент дихотомического дерева поиска места отказа

Введем ряд дополнительных признаков  $z_{дi}$ , сформированных на основании гипотезы квазистационарности прямого признака отказа  $\Delta\gamma_q$  на интервале диагностирования [5]:

$$\Delta\hat{\gamma}_i(k) = \text{const} \cap \Delta\hat{\gamma}_j(k) = \text{var},$$

$$\text{if } \Delta\gamma_i \neq 0 \cap (u(k) \neq 0 \cap x(k) \neq \text{const}); \quad (24)$$

$$i, j = \overline{1, N_\gamma}, i \neq j.$$

$$z_{дi} = S_2 \{I_{стi} \leq \Delta I_{стi}\} = \begin{cases} 1, & \text{if } I_{стi} \leq \Delta I_{стi}; \\ 0, & \text{if } I_{стi} > \Delta I_{стi}, \end{cases} \quad (25)$$

$$I_{стi} = \left| \frac{d(\hat{\gamma}_i)}{dt} \right|, \quad i \in \{1, 2, \dots, N_\gamma\}.$$

Так как функции чувствительности для рассматриваемых классов отказов линейно независимы, оценочное значение прямого признака возникшего отказа  $\Delta\hat{\gamma}_i$  на интервале диагностирования остается постоянным, в то время как оценочные значения прямых признаков остальных отказов изменяются при изменении управляющих сигналов и переменных состояния, входящих в соответствующие функции чувствительности:

Для определения скорости изменения оценочных значений прямых признаков отказов при наличии помех использован метод наименьших квадратов (МНК).

Для каждого обрабатываемого сигнала на интервале диагностирования в вычислителе формируются массивы данных  $Y_i$ , а затем по выражению (26) рассчитывается коэффициент наклона аппроксимирующей прямой.

Расширенная логическая (TLR) модель для множества классов отказа первого ИО, построенная

с учетом введения дополнительных косвенных признаков (25), а также измерения сигнала в дополнительной КТ (27) представлена в табл. 2.

$$\frac{d\hat{\gamma}_i}{dt} \approx \frac{N \sum_{j=1}^N t(j) Y_i(j) - \sum_{j=1}^N t(j) \sum_{j=1}^N Y_i(j)}{N \sum_{j=1}^N t^2(j) - \left( \sum_{j=1}^N t(j) \right)^2}, \quad (26)$$

$$t(j) = j \cdot T_0; N = \frac{t_d}{T_0}.$$

$$z_{ym_i} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\hat{K}_{ym_i} - K_{ym_i}| \leq \varepsilon_{ym_i}; \\ 1, & \text{если } |\hat{K}_{ym_i} - K_{ym_i}| > \varepsilon_{ym_i}, \end{cases} \quad (27)$$

$$\hat{K}_{ym_i} = \frac{u_{ym_i}(k)}{u_i(k)}, \quad i = \overline{1, 4}.$$

Таблица 2

TLR модель для множества классов отказов первого ИО

| $\gamma_q$ | Косвенные диагностические признаки |           |          |          |          |          |          |          |          |
|------------|------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|            | $z_1$                              | $z_{ym1}$ | $z_{д1}$ | $z_{д2}$ | $z_{д3}$ | $z_{д4}$ | $z_{д5}$ | $z_{д6}$ | $z_{д7}$ |
| $\gamma_1$ | 1                                  | 1         | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| $\gamma_2$ | 1                                  | 0         | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| $\gamma_3$ | 1                                  | 0         | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| $\gamma_4$ | 1                                  | 0         | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| $\gamma_5$ | 1                                  | 1         | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        |
| $\gamma_6$ | 1                                  | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        |
| $\gamma_7$ | 1                                  | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        |

Подобным образом выглядят TLR модели для остальных элементов системы. После минимизации полученных таблиц можно записать безусловные или условные правила поиска места и правила определения класса отказа для рассматриваемого множества классов отказов [2,6].

Косвенные диагностические признаки для определения вида отказа получаем исходя из функциональных зависимостей связывающих конкретный вид отказа с прямым признаком соответствующего класса отказа. Так для различных видов отказов необходимо введение следующих дополнительных косвенных признаков.

$$z_{полi} = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta\hat{\gamma}_i < 0; \\ 1, & \text{если } \Delta\hat{\gamma}_i > 0. \end{cases} \quad (28)$$

$$z_{обрі} = \begin{cases} 1, & \text{если } |\hat{\gamma}_{i\text{cp}}(k)| < \varepsilon_{\gamma_i}; \\ 0, & \text{если } |\hat{\gamma}_{i\text{cp}}(k)| > \varepsilon_{\gamma_i}. \end{cases} \quad (29)$$

$$z_{кз} = \begin{cases} 1, & \text{если } |u_{умі\text{cp}}(k)| < \varepsilon_{ум_i}; \\ 0, & \text{если } |u_{умі\text{cp}}(k)| > \varepsilon_{ум_i}. \end{cases} \quad (30)$$

$$z_{+прі} = \begin{cases} 1, & \text{если } |u_{умі\text{cp}} - u_{ум\text{max}}| < \varepsilon_{ум_i}; \\ 0, & \text{если } |u_{умі\text{cp}} - u_{ум\text{max}}| > \varepsilon_{ум_i}. \end{cases} \quad (31)$$

$$z_{-прі} = \begin{cases} 1, & \text{если } |u_{умі\text{cp}} - u_{ум\text{min}}| < \varepsilon_{ум_i}; \\ 0, & \text{если } |u_{умі\text{cp}} - u_{ум\text{min}}| > \varepsilon_{ум_i}. \end{cases} \quad (32)$$

Выражение (28) используется для поиска вида отказа, характеризующегося прямым диагностическим признаком из множества  $D_1$ .

$$D_1 = \{\tilde{u}_{ум10}, \tilde{u}_{дс10}, \dots, \tilde{u}_{ум40}, \tilde{u}_{дс40}, \tilde{M}_{в_x}, \tilde{u}_{дус_x0}, \tilde{I}_x, \dots, \tilde{u}_{дус_z0}, \tilde{I}_z\}. \quad (31)$$

Выражения (29)-(32) используются для поиска вида отказа характеризующегося прямым диагностическим признаком из множества  $D_2$ .

$$D_2 = \{K_{ум1}, K_{дс1}, \dots, K_{ум4}, K_{дс4}\}. \quad (32)$$

На рис. 8 и 9 представлены фрагменты дихотомических деревьев поиска класса и вида отказа, в узлах которого находятся двухзначные предикаты (23), (27) – (32).

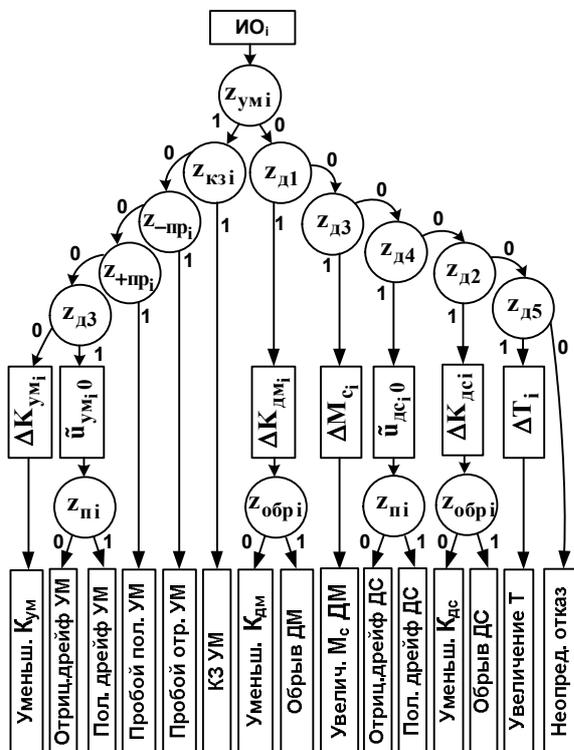


Рис. 8. Фрагмент дихотомического дерева поиска класса и вида отказа в ИО

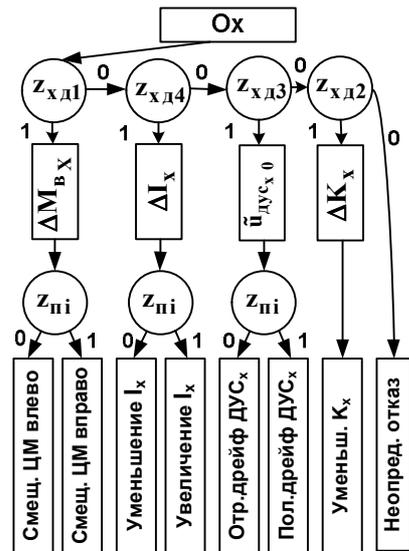


Рис. 9. Фрагмент дихотомического дерева поиска класса и вида в КА и БДУС

После определения класса и вида отказа оценочное значение соответствующего отклонения параметра системы  $\Delta \hat{\gamma}_i$ , определяемое на этапе поиска класса отказа, передается в регулятор для последующего использования в алгоритмах коррекции работы системы.

### Заключение

Анализ системы ориентации углового положения микроспутника с использованием сигнально-параметрического подхода к диагностированию технических систем показал, что на переходных режимах работы система полностью диагностируема относительно заданного множества видов отказов, приводящих к изменению статических и динамических свойств функциональных элементов. Построены диагностические функциональные и логические модели, связывающие прямые и косвенные диагностические признаки. Определено множество контрольных точек, косвенных признаков, а также правила их обработки, обеспечивающие глубину диагностирования до вида отказа. Показано, что методы сигнально-параметрического подхода могут быть применены для оценки возмущающих моментов, воздействующих на ИО и корпус КА.

Информация о виде и численном значении отказа может быть использована в дальнейшем системой для его компенсации сигнальной и параметрической подстройкой, а также реконфигурацией алгоритмов управления.

Полученные в настоящей статье результаты могут быть полезны разработчикам систем ориентации и стабилизации углового положения КА, а также систем управления другими объектами, содержащими в своем составе ДМ.

## Литература

1. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники: учеб. пособие / А.И. Батырев, Б.И. Батырев, Г.К. Бондарец и др.; под общ. ред. Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП «Хартрон-Аркос», 2008. – 501 с.
2. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления: монография / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
3. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов. / А.П. Разыграев. – М.: Машиностроение, 1990. – 480 с.
4. Кулик А.С. Эффективность избыточных систем стабилизации и ориентации космических аппаратов с двигателями-маховиками / А.С. Кулик, А.М. Суббота, О.В. Резникова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 3. – С. 18-24.
5. Кулик А.С. Использование минимально избыточного блока двигателей-маховиков для угловой ориентации космического аппарата / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, А.Н. Таран // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 6. – С. 42-48.
6. Фирсов С.Н. Обеспечение активной отказоустойчивости пневматического сервопривода беспилотного летательного аппарата: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.03. / Фирсов Сергей Николаевич. – Х., 2005. – 201 с.

Поступила в редакцию 20.11.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информатики А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМАХОВИЧНОЇ СИСТЕМИ ОРІЕНТАЦІЇ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ МІКРОСУПУТНИКА

*А.С. Кулік, С.М. Фірсов, О.М. Таран*

У статті розглянуто використання сигнально-параметричного підходу для діагностування функціонального стану електромаховичної системи орієнтації кутового положення мікросупутника. Розглянуто види відмов, що спричиняють зміну статичних і динамічних властивостей виконавчих органів, датчиків зворотного зв'язку та об'єкту управління. Запропоновано використання методів діагностування для визначення впливу зовнішніх збурюючих моментів на виконавчі органи і корпус космічного апарату. Отримані умови розрізності класів відмов і множина непрямих ознак, що забезпечують діагностування з глибиною до виду відмови.

**Ключові слова:** космічний апарат, керування, орієнтація, двигун маховик, датчик кутової швидкості, відмова, діагностування, сигнально-параметричний підхід.

### FUNCTIONAL STATE DIAGNOSIS OF THE MICROSATELLITE ANGLE ORIENTATION SYSTEM WITH REACTION WHEELS

*A.S. Kulik, S.N. Firsov, A.N. Taran*

Usage of signal-parametric approach for functional state diagnosis of the microsatellite angle orientation system with reaction wheels is described in the article. The types of faults which result in changes of static and dynamic properties of actuators, feedback sensors and control object are considered. Usage of diagnostic methods is proposed for estimation of external disturbing moments of reaction wheels and spacecraft. The terms of distinguishability, set of indirect signs and classification rules for diagnosis with deep to fault mode are received.

**Key words:** spacecraft, control, orientation, reaction wheel, angular velocity sensor, fault, diagnosis, signal-parametric approach.

**Кулик Анатолій Степанович** – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедри систем управління летальних апаратів, декан факультета систем управління летальних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: kulik@d3.khai.edu.

**Фірсов Сергій Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем управління летальних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: firsov@d3.khai.edu.

**Таран Александр Николаевич** – асистент кафедри систем управління летальних апаратів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: Taran\_A\_N@mail.ru.