

УДК 681.5.09

С.Н. Фирсов, А.Н. Таран

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

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО БЛОКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В статье рассмотрено использование сигнально-параметрический подхода к диагностированию функционального состояния электромеханического блока космического аппарата. Теоретически и экспериментально показано, что без изменения конструкции объекта диагностирования, по наблюдению выходного сигнала датчика угловой скорости вращения двигателя маховика на переходных режимах можно различать отказы, вызванные изменением коэффициентов передачи датчика скорости, электронной схемы управления двигателем, а также изменением момента сопротивления вращению двигателя-маховика. Предложено использование программных имитаторов отказов для отладки и настройки диагностического обеспечения.

Ключевые слова: космический аппарат, электромеханический блок, двигатель-маховик, управление, отказ, диагностирование, сигнально-параметрический подход, программный имитатор отказов.

Введение

Проблема управления искусственными спутниками становится все более важной при увеличении требований к точности и скорости стабилизации и ориентации углового положения (СОУП) космического аппарата (КА). Одними из наиболее широко используемых в системах СОУП исполнительными органами являются двигатели-маховики (ДМ). Это обусловлено простотой устройства и функционирования, значительными по величине вырабатываемыми управляющими моментами, а также возможностью восполнения энергетических затрат при помощи солнечных батарей [1, 2].

Эффективность использования того или иного исполнительного органа зависит от требований надежности, точности обеспечения ориентации и стабилизации КА, а также необходимости нормального функционирования в условиях отказов элементов системы управления (СУ) [3 – 5]. Зачастую, настроенный на номинальные параметры функционирования объекта, алгоритм управления не является таковым в случае возникновения отказов в системе, приводящим к изменению характеристик или выходу из строя основных элементов системы. Это в свою очередь приводит к снижению качества управления или неустойчивому движению объекта. Для исключения подобных ситуаций необходимо своевременно в процессе работы СУ определять наличие, класс и численное значение величин отклонения параметров системы от номинальных. Наличие данной информации позволяет оперативно производить компенсацию отказов с использованием существующих на борту КА избыточностей, а также осуществлять перенастройку или реконфигурацию алгоритмов управления.

Выбор подхода к диагностированию и имитации отказов

В работе [3] произведен анализ сигнального и параметрического подходов к диагностированию технических систем и предлагается применение нового сигнально-параметрического подхода, который основывается на использовании в качестве диагностических признаков отклонений выходных сигналов системы, а также отклонений параметров отказов от номинальных. Для этого изучаются аварийные состояния системы управления при возможных отказах с целью построения математических моделей, отражающих аварийные и номинальные режимы функционирования.

Исследование структурных и сигнальных свойств полученных моделей позволяет обоснованно произвести декомпозицию исходного математического описания, сформировать множество контрольных точек, выбрать требуемую структуру и характер управляющих сигналов, обеспечивающих полную диагностируемость системы в отношении множества возможных отказов. Для каждой задачи диагностирования строятся диагностические модели (ДМ), представляющие собой особый класс математических моделей, которые связывают прямые и косвенные признаки отказов. Полученные ДМ объединяются в иерархию ДМ, причем на нижнем уровне иерархии находятся ДМ определения классов отказа, а на верхнем – ДМ обнаружения отказа [3 – 5]. Сигнально-параметрический подход достаточно апробирован на различных объектах при их свободном движении [4, 5].

Во время проведения испытаний на качество работы СУ и диагностического обеспечения, при помощи специализированных имитаторов должны быть обеспечены все предполагаемые условия и ре-

жимы функционирования системы. Современные системы испытаний используют для этих целей аппаратные и программные имитаторы. Программные имитаторы по сравнению с аппаратными обладают рядом существенных преимуществ: возможность быстрой модификации, имитация широкого множества эксплуатационных условий, простота интерпретации результатов, незначительные энергозатраты, хорошая адаптируемость [6, 7].

В силу необходимости уменьшения времени разработки и снижения затрат на всех этапах жизненного цикла изделия, невозможности физически проимитировать значительную часть условий эксплуатации, а также в связи с повышением интеллекта подобных систем, все большая функциональная нагрузка перекладывается разработчиком систем испытаний на программное обеспечение, оставляя за аппаратной составляющей лишь отдельные легко моделируемые условия эксплуатации КА. Преимущества такого подхода очевидны, так как существует возможность последующей функциональной модернизации имитатора без замены аппаратной части.

В статье предполагается применение сигнально-параметрического подхода для определения некоторых параметрических отказов в электромеханическом блоке (ЭМБ) КА без внесения в его конструкцию существенных изменений и дополнительных контрольных точек. Для отладки и настройки диагностического обеспечения необходимо разработать программные имитаторы, отражающие влияние на объект диагностирования множества рассматриваемых классов отказов.

Математическое описание ЭМБ

На КА ДМ применяются в составе ЭМБ, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

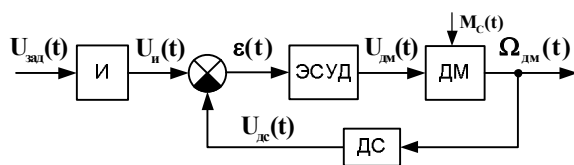


Рис.1. Функциональная схема ЭМБ

ЭМБ состоит из ДМ, электронной схемы управления двигателем (ЭСУД), интегратора (И) и датчика скорости вращения (ДС). При наличии на входе схемы ненулевого задающего сигнала $U_{зад} \neq 0$ ДМ наращивает или уменьшает угловую скорость вращения в соответствии со знаком $U_{зад}$, тем самым вырабатывая управляющий реактивный момент, пропорциональный величине входного сигнала. Обратная связь используется для стабилизации коэффициента передачи ЭМБ [2, 7].

В цифровых системах для определения скорости $\Omega_{дм}$ могут применяться дискретные оптические

датчики, датчики Холла и т.д., а интегратор и сумматор при этом реализованы в виде соответствующих программных блоков в управляющем микроконтроллере. Соответственно, в дальнейшем при построении моделей номинального и аварийного функционирования ЭМБ исследуем схему без интегратора.

При математическом описании ЭМБ представим ЭСУД и ДС в виде безинерционных звеньев, характеризующихся лишь коэффициентами передачи $K_{эсуд}$ и $K_{дс}$ соответственно [8]. На линейном участке работы ДМ можно представить апериодическим звеном первого порядка. Его передаточные функции по управляющему входу и входу возмущения при этом имеют вид:

$$W_{U_{дм}}^{\Omega_{дм}}(s) = \frac{\Omega_{дм}(s)}{U_{дм}(s)} = \frac{K_{Mэ}}{Js + K_{Mэ}K_{э}}; \quad (1)$$

$$W_{M_c}^{\Omega_{дм}}(s) = \frac{\Omega_{дм}(s)}{M_c(s)} = -\frac{1}{Js + K_{Mэ}K_{э}}, \quad (2)$$

где M_c – момент сопротивления вращению ДМ; J – собственный момент инерции ДМ; $K_{Mэ}$ – коэффициент передачи двигателя по электродвижущему моменту; $K_{э}$ – коэффициент связи между вырабатываемой противо-ЭДС и угловой скоростью вращения ДМ.

Исходя из математического описания элементов ЭМБ, угловая скорость вращения ДМ связана с входными сигналами дифференциальным уравнением:

$$J\dot{\Omega}_{дм}(t) + K_2\Omega_{дм}(t) = K_1U_{и}(t) - M_c(t), \quad (3)$$

где $U_{и}$ – задающий сигнал с интегратора;

$$K_1 = K_{эсуд}K_{Mэ}; \quad K_2 = K_{Mэ}K_{э} + K_{Mэ}K_{эсуд}K_{дс}. \quad (4)$$

Для описания ЭМБ в пространстве состояния определим переменные состояния и измеряемые величины:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= U_{дс}(t) = K_{дс}\Omega_{дм}(t); \quad \dot{x}_1(t) = K_{дс}\dot{\Omega}_{дм}(t); \\ y(t) &= U_{дс}(t) = x_1(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку в СУ измерения производятся с временным интервалом T_0 , представим производную переменной состояния с использованием метода Эйлера [8]:

$$\dot{x}_1(t) \approx \frac{x_1(kT_0 + T_0) - x_1(kT_0)}{T_0}; \quad t = T_0k, k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Получаем систему уравнений в дискретном виде (7). Для простоты записи в выражениях вида $x_1(kT_0)$, $y(kT_0)$ опущено T_0 .

$$\begin{cases} x_1(k+1) = \left(1 - \frac{T_0K_2}{J}\right)x_1(k) + \frac{T_0K_1K_{дс}}{J}U_{и}(k) - \\ - \frac{T_0K_{дс}}{J}M_c(k); \\ y(k) = x_1(k); \quad x_1(0) = x_{10}, \quad |U_{и}(t)| \leq U_{и\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений (7) описывает номинальный режим функционирования ЭМБ на линейном участке статической характеристики.

Математическая модель ЭМБ в неработоспособном состоянии

При построении математических моделей функционирования ЭМБ в неработоспособном состоянии рассмотрим следующие классы отказов:

- изменение коэффициента передачи ЭСУД

$$\tilde{K}_{эсуд} = K_{эсуд} + \Delta K_{эсуд}; \quad (8)$$

- изменение коэффициента передачи ДС

$$\tilde{K}_{дс} = K_{дс} + \Delta K_{дс}; \quad (9)$$

- изменение момента сопротивления вращению ДМ

$$\tilde{M}_c = M_{c \text{ ном}} + \Delta M_c. \quad (10)$$

В структуре системы уравнений (7) $M_c(k)$ является входным сигналом. Использовать его при расчетах не представляется возможным, так как он не подлежит непосредственному измерению. Для дальнейшего использования методов сигнально-параметрического подхода к диагностированию СУ, представим момент сопротивления в виде некоторого коэффициента K_{Mc} умноженного на единичный входной сигнал:

$$\tilde{M}_c(k) = \tilde{K}_{Mc} M_c(k); \quad M_c(k) = \text{const} = 1. \quad (11)$$

При этом номинальное значение коэффициента K_{Mc} и его отклонение ΔK_{Mc} будет равняться соответствующим величинам момента сопротивления вращению:

$$K_{Mc} = M_{c \text{ ном}}(k), \quad \Delta K_{Mc} = \Delta M_c(k). \quad (12)$$

В терминах введенных отказов, исходя из (7) получена модель возмущенного функционирования ЭМБ:

$$\begin{cases} \tilde{x}_1(k+1) = \left(1 - \frac{T_0 \tilde{K}_2}{J}\right) x_1(k) + \frac{T_0 \tilde{K}_1 \tilde{K}_{дс}}{J} \cdot U_{и}(k) - \\ - \frac{T_0 \tilde{K}_{дс} \tilde{K}_{Mc}}{J} M_c(k); \\ \tilde{y}(k) = \tilde{x}_1(k); \quad \tilde{x}_1(0) = \tilde{x}_{10}, \quad |U_{и}(k)| \leq U_{и \text{ max}}, \\ M_c(k) = \text{const} = 1; \end{cases} \quad (13)$$

С учетом (4) и (13) матрицы $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}$, определяющие возмущенный режим функционирования ЭМБ, имеют вид

$$\tilde{A} = \left[1 - \frac{T_0 (K_{M3} K_{Э} + K_{M3} \tilde{K}_{эсуд} \tilde{K}_{дс})}{J} \right]; \quad \tilde{C} = [1]; \quad (14)$$

$$\tilde{B} = \left[\frac{T_0 K_{M3} \tilde{K}_{дс} \tilde{K}_{эсуд}}{J} \quad \frac{T_0 \tilde{K}_{дс} \tilde{K}_{Mc}}{J} \right]; \quad \tilde{D} = [0 \quad 0].$$

Система уравнений (13) описывает режим возмущенного функционирования ЭМБ для рассматриваемого множества классов отказов.

Диагностическое обеспечение ЭМБ

ЭМБ структурно диагностируем относительно введенных классов отказов, так как составные матрицы P_{γ_i} являются линейно независимыми во всех парных сочетаниях [3 – 5]:

$$P_{\gamma_i} = \begin{bmatrix} A_{\gamma_i} & B_{\gamma_i} \\ C_{\gamma_i} & D_{\gamma_i} \end{bmatrix}; \quad A_{\gamma_i} = \frac{\partial \tilde{A}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i}; \quad B_{\gamma_i} = \frac{\partial \tilde{B}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i}; \quad (15)$$

$$C_{\gamma_i} = \frac{\partial \tilde{C}(\gamma_i)}{\partial \beta_{\gamma_i}}; \quad D_{\gamma_i} = \frac{\partial \tilde{D}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i}; \quad \gamma = \{ \tilde{K}_{эсуд}, \tilde{K}_{дс}, \tilde{K}_{Mc} \}.$$

Анализ парных сочетаний характеристических векторов Ψ_{γ_i} показывает, что ЭМБ сигнально диагностируем относительно введенного множества отказов при выполнении условия (17), т.е. при изменяющемся входном сигнале с интегратора.

$$\Psi_{\gamma_i} = P_{\gamma_i} V; \quad (16)$$

$$V = [x_1(k), U_{и}(k), M_c(k)]^T;$$

$$U_{и}(k) \neq \text{const}, \quad \forall k \in [0, \frac{T_d}{T_0}], \quad (17)$$

где T_d – длительность процесса диагностирования.

Для объектов с известным входом, к которым относится ЭМБ, процедуру обнаружения отказов условно можно представить с помощью функциональной схемы приведенной на рис. 2.

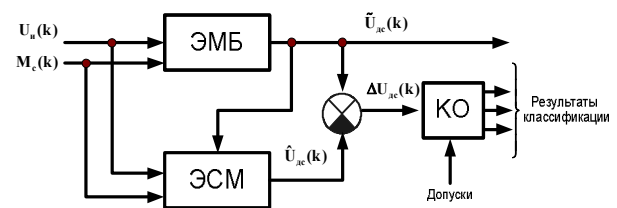


Рис. 2. Структурная схема определения отказов в ЭМБ с использованием ЭСМ

Воспроизведение эталонного поведения ЭМБ $\hat{U}_{дс}(k)$ осуществляется с помощью эталонной статической модели (ЭСМ) на основании сигнала $U_{и}(k)$.

По разностному сигналу $\Delta U_{дс}(k)$ производится классификационная обработка относительно заранее сформированного допуска. Выходной сигнал элемента сравнения $\Delta U_{дс}(k)$ представляет собой косвенный диагностический признак ЭМБ.

ЭСМ описывается следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{x}_1(k+1) = A \hat{x}_1(k) + Bu(k); \\ \hat{y}(k) = C \hat{x}_1(k) + Du(k), \end{cases} \quad (18)$$

где $\hat{x}_1(k) = \hat{U}_{дс}(k)$, $\hat{x}_1(k) = \tilde{U}_{дс}(k)$,

$$u(k) = [U_{и}(k) \quad M_c(k)], \quad M_c(k) = \text{const} = 1.$$

Матрицы A, B, C, D , определяющие номинальный режим функционирования ЭМБ, имеют вид:

$$A = \left[1 - \frac{T_0(K_{M3}K_{\Delta} + K_{M3}K_{\text{эсуд}}K_{\text{дс}})}{J} \right]; C = [1]; \quad (19)$$

$$B = \left[\frac{T_0K_{M3}K_{\text{дс}}K_{\text{эсуд}}}{J} \quad \frac{T_0K_{\text{дс}}K_{M\text{с}}}{J} \right]; D = [0 \quad 0].$$

Вычитая из системы уравнений, описывающих возмущенное движение ЭМБ (13) ЭСМ (18) получаем:

$$\begin{cases} \Delta x_1(k+1) = \Delta A \tilde{x}_1(k) + \Delta B u(k); \\ \Delta y(k) = C \Delta x_1(k), \end{cases} \quad (20)$$

Система уравнений (20) является диагностической статической моделью ЭМБ. Особенности этой модели являются отсутствие инерционных свойств и независимость ее выходного сигнала от начальных условий объекта диагностирования.

Показатель качества функционирования ЭМБ зададим среднеквадратичным функционалом

$$I_3 = \sum_{k=1}^N \Delta U_{\text{дс}}^2(k) / N, \quad (21)$$

где $\Delta U_{\Pi}(k)$ – разностный сигнал между выходом ЭМБ и ЭМ; N – количество измерений.

Если ограничить множество параметров ЭМБ только параметрами появления отказов γ_i , $i = \overline{1,3}$, то для задачи определения допусков на отклонение $\Delta U_{\text{дс}}(k)$ можно записать следующее равенство:

$$\Delta U_{\text{дс}} \gamma_i(k) = \varphi_{\gamma_i}(k) \Delta \gamma_i, \quad i = \overline{1,3}, \quad (22)$$

где $\varphi_{\gamma_i}(k)$ – функция чувствительности признака $\Delta U_{\text{дс}}(k)$ к признаку $\Delta \gamma_i$; $\Delta \gamma_i$ – прямой диагностический признак, изменение которого характеризует возникновение отказа в ЭМБ.

Исходя из (20) функции чувствительности для множества рассматриваемых классов отказов:

$$\begin{aligned} \varphi_{\tilde{x}_{\text{эсуд}}}(k) = & -\frac{T_0K_{M3}K_{\text{дс}}}{J} \tilde{x}_1(k-1) + \\ & + \frac{T_0K_{M3}K_{\text{дс}}}{J} U_{\text{и}}(k-1); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\tilde{x}_{\text{дс}}}(k) = & -\frac{T_0K_{M3}K_{\text{эсуд}}}{J} \tilde{x}_1(k-1) + \\ & + \frac{T_0K_{M3}K_{\text{эсуд}}}{J} U_{\text{и}}(k-1) - \frac{T_0K_{M\text{с}}}{J} M_{\text{с}}(k-1); \end{aligned} \quad (24)$$

$$\varphi_{\tilde{x}_{M\text{с}}}(k) = -\frac{T_0K_{\text{дс}}}{J} M_{\text{с}}(k-1). \quad (25)$$

На основании известных допусков на диагностические параметры: $\gamma_i \min \leq \gamma_i \leq \gamma_i \max$, значений управляющих сигналов и переменных состояния по функциям чувствительности (23) – (25), с помощью соотношения (22) определяются нижняя и верхняя границы допустимых изменений признаков:

$$\Delta U_{\text{дс}}(k) \in [\Delta U_{\text{дс}\min}(k), \Delta U_{\text{дс}\max}(k)];$$

$$\Delta U_{\text{дс}\min}(k) = \min \left\{ \begin{array}{l} \Delta U_{\text{дс}\min\gamma_1}(k), \Delta U_{\text{дс}\min\gamma_2}(k), \\ \Delta U_{\text{дс}\min\gamma_3}(k) \end{array} \right\}; \quad (26)$$

$$\Delta U_{\text{дс}\max}(k) = \max \left\{ \begin{array}{l} \Delta U_{\text{дс}\max\gamma_1}(k), \Delta U_{\text{дс}\max\gamma_2}(k), \\ \Delta U_{\text{дс}\max\gamma_3}(k) \end{array} \right\}.$$

По полученной оценке и выражению (21) вычисляются поле допуска для показателя качества I_3 :

$$\Delta I = [I_{3\min}, I_{3\max}]. \quad (27)$$

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

$$z_{\text{эмб}1} = \begin{cases} 0, & \text{если } I_3 \in \Delta I; \\ 1, & \text{если } I_3 \notin \Delta I. \end{cases} \quad (28)$$

Если значение предиката $z_{\text{эмб}1}$ равно «1», значит, в ЭМБ произошел отказ, если равно «0», то он функционирует нормально. После обнаружения факта наличия отказа в ЭМБ, необходимо определить его класс и оценить численное значение прямого диагностического признака $\hat{\Delta \gamma}_i$.

Анализ структуры (22) – (25) показывает, что отказы любого из рассматриваемых классов вызывают изменение единственного косвенного диагностического признака $\Delta U_{\text{дс}}(k)$, следовательно, они являются неразличимыми по данному признаку. Для обеспечения различимости классов отказов введем ряд дополнительных признаков $z_{\text{эмб}j}$ [5]. Анализ уравнений (22) – (25) совместно с (29), показывает, что в переходных режимах $U_{\text{и}}(k) \neq \text{const}$ или $\tilde{x}_1(k) \neq \text{const}$ в случае наличия отказа в системе $\Delta \gamma_i$, квазистационарного на интервале диагностирования, оценочное значение $\hat{\Delta \gamma}_i$ остается постоянным, в то время как оценочные значения других прямых признаков отказов изменяются в соответствии с изменением входного сигнала $U_{\text{и}}(k)$ или переменной состояния $\tilde{x}_1(k)$ ЭМБ:

$$\hat{\Delta \gamma}_i = \frac{\Delta y(k)}{\frac{\partial \tilde{A}(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} x_1(k-1) + \frac{\partial \tilde{B}(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} u(k-1)}; \quad i = \overline{1,3}; \quad (29)$$

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

$$\text{если } \Delta \gamma_i \neq 0 \cap (U_{\text{и}}(k) = \text{var} \cup \tilde{x}_1(k) = \text{var}), \quad (30)$$

$$i, j = \overline{1,3}; i \neq j.$$

Соотношение (30) позволяет сформировать дополнительные косвенные диагностические признаки, описываемые предикатным уравнением вида:

$$\begin{aligned} z_{\text{эмб}i+1} = & S_2 \left\{ I_{3\text{эмб}\gamma_i} \leq \Delta I_{3\text{эмб}\gamma_i} \right\} = \\ = & \begin{cases} 1, & \text{если } I_{3\text{эмб}\gamma_i} \leq \Delta I_{3\text{эмб}\gamma_i}; \\ 0, & \text{если } I_{3\text{эмб}\gamma_i} > \Delta I_{3\text{эмб}\gamma_i}; \end{cases} \end{aligned} \quad (31)$$

$$I_{3\text{эмб}\gamma_i} = \left| \hat{\gamma}_i(k+1) - \hat{\gamma}_i(k) \right|, \quad i = \overline{1,3}, \quad (32)$$

где $I_{z_{эмб} \gamma_i}$ – показатель качества функционирования ЭМБ по параметру γ_i ; $\Delta I_{z_{эмб} \gamma_i}$ – допуск на изменение соответствующего показателя качества.

По косвенным диагностическим признакам $z_{эмб1}, \dots, z_{эмб4}$ получена TLR модель ЭМБ, представленная в табл. 1. Минимизации таблицы показывает, что для определения класса отказа достаточно одной из пар диагностических признаков $\{z_{эмб2}, z_{эмб3}\}, \{z_{эмб3}, z_{эмб4}\}$ или $\{z_{эмб2}, z_{эмб4}\}$. Зависимости для вычисления $z_{эмб2}, \dots, z_{эмб4}$ содержат функции чувствительности, описываемые уравнениями (21)–(23). Так как, исходя из структуры уравнения (24), расчет $z_{эмб3}$ требует наибольшего вычислительного ресурса, целесообразно использовать диагностические признаки $\{z_{эмб2}, z_{эмб4}\}$.

Таблица 1

TLR модель для множества классов отказов

$\Delta \gamma_i$	Косвенные диагностические признаки			
	$z_{эмб1}$	$z_{эмб2}$	$z_{эмб3}$	$z_{эмб4}$
$\Delta K_{эсуд}$	1	1	0	0
$\Delta K_{дс}$	1	0	1	0
$\Delta K_{мс}$	1	0	0	1

Первый дополнительный признак $z_{эмб2}$ разделяет множество классов отказов на два подмножества: первое включает в себя $\Delta K_{эсуд}$, а второе содержит прямые признаки $\Delta K_{дс}$ и $\Delta K_{мс}$. Второе подмножество разделяется в свою очередь косвенным признаком $z_{эмб4}$. В результате применения минимального количества косвенных диагностических признаков получен оптимальный вариант правил обнаружения и поиска класса отказа (рис. 3).

Рис. 3 представляет собой дихотомическое дерево, в узлах которого находятся двухзначные предикаты (28) и (31). После определения класса отказа по выражению (29) рассчитывается оценочное значение прямого признака отказа $\hat{\Delta \gamma}_j, j \in \{1, 2, 3\}$.

Экспериментальная отработка диагностического обеспечения

Отработка диагностического обеспечения для ЭМБ производилась на экспериментальном стенде (рис. 4), разработанном на кафедре СУЛА ХАИ и предназначенном для полунатурного моделирования углового движения КА с двигателями маховиками, установленными по альтернативной пирамидальной схеме. Функциональная схема стенда представлена на рис. 5.

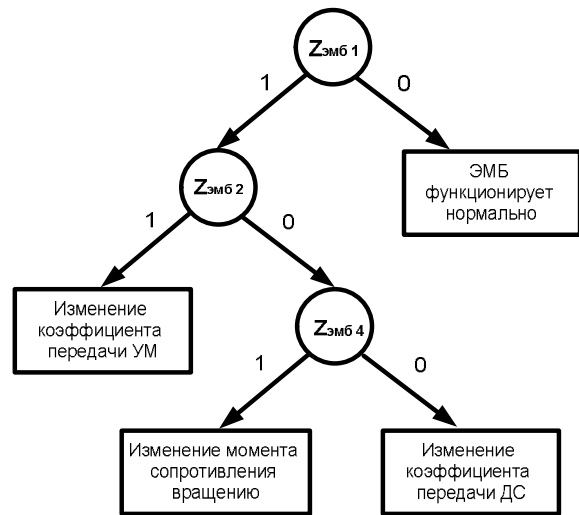


Рис. 3. Дихотомическое дерево обнаружения и определения класса отказа в ЭМБ

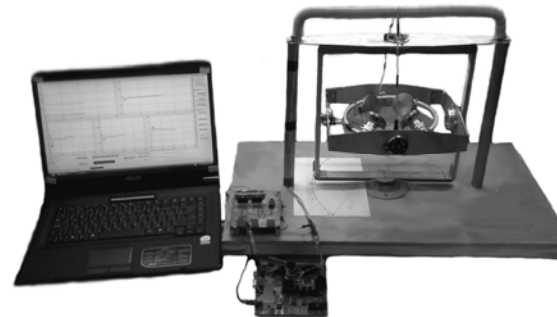


Рис. 4. Стенд полунатурного моделирования углового движения КА с БДМ

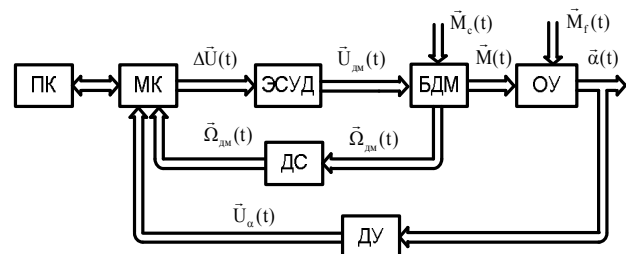


Рис. 5. Функциональная схема стенда

Стенд представляет собой платформу с БДМ (ОУ), установленную в кардановом подвесе. Угловое положение ОУ $\alpha(t)$ измеряется при помощи датчиков угла (ДУ), определяющих соответствующие повороты рамок. Обработка и преобразование сигналов с датчиков скоростей вращения ДМ (ДС), ДУ, а также численное интегрирование и формирование вектора управляющих сигналов $\Delta \bar{U}(t)$ производится в микроконтроллерном модуле (МК). Персональный компьютер (ПК) со специализированным программным обеспечением (ПО), соединяемый с МК по последовательному интерфейсу RS-232 или USB, необходим для визуализации параметров работы стенда, а также формирования задающих воздействий и режимов работы системы.

Имитация отказов в ЭМБ стенда производится как аппаратным, так и программным способом. Например, изменение коэффициента передачи ЭСУД можно задать, изменив напряжение питания соответствующего устройства, а изменение момента сопротивления вращению имитируется введением в систему дополнительного внешнего тормозного элемента.

Помимо аппаратной имитации, рассматриваемые отказы ЭМБ могут задаваться с использованием программных имитаторов отказов (ПИО), обеспечивающих искажение наблюдаемых сигналов объекта диагностирования (ОД), эквивалентное реакции системы на вводимые классы отказов (рис. 6).

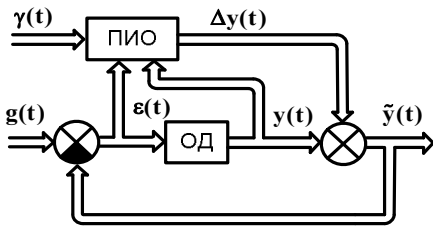


Рис. 6. Обобщенная функциональная схема программной имитации отказов

ПИО в каждый момент времени на основании измеряемых в системе сигналов $y(t)$ и $\varepsilon(t)$, характеризующих состояние ОД и класса вводимого отказа $\gamma(t)$, прибавляет к выходным сигналам ОД $y(t)$ соответствующее приращение $\Delta y(t)$.

Для построения ПИО для ЭМБ рассмотрим структурную схему разомкнутой системы, представленную на рис. 7.

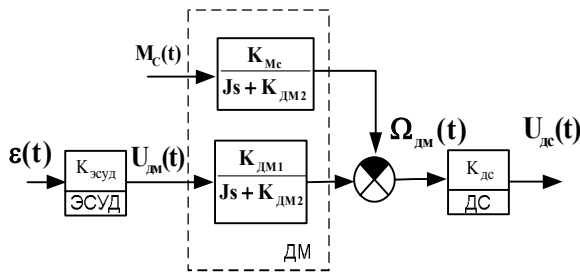


Рис. 7. Структурная схема разомкнутого ЭМБ

Передаточные функции разомкнутого ЭМБ имеют вид:

$$W_{\varepsilon}(s) = \frac{U_{дс}(s)}{E(s)} = \frac{K_{эсуд} K_{дм1} K_{дс}}{Js + K_{дм2}}; \quad (33)$$

$$W_{M_c}(s) = \frac{U_{дс}(s)}{M_c(s)} = -\frac{K_{мс} K_{дс}}{Js + K_{дм2}}. \quad (34)$$

По (33), (34) можно вычислить на какую величину $\Delta U_{дс}(s)$ должен измениться выход системы, при изменении любого из коэффициентов передаточных функций. Например, для отказа «изменение коэффициента передачи ЭСУД» получаем:

$$\begin{aligned} \Delta U_{дс}(s) \Big|_{\tilde{K}_{эсуд} = K_{эсуд} + \Delta K_{эсуд}} &= \tilde{U}_{дс}(s) - U_{дс}(s) = \\ &= \frac{\Delta K_{эсуд} K_{дм1} K_{дс}}{Js + K_{дм2}} E(s). \end{aligned} \quad (35)$$

Соответственно, передаточные функция ПИО в этом случае будут иметь вид:

$$\begin{aligned} W_{И \varepsilon}(s) \Big|_{\tilde{K}_{эсуд} = K_{эсуд} + \Delta K_{эсуд}} &= \frac{\Delta U_{дс}(s)}{E(s)} = \\ &= \frac{\Delta K_{эсуд} K_{дм1} K_{дс}}{Js + K_{дм2}} = \frac{\Delta K_{эсуд}}{K_{эсуд}} W_u(s); \end{aligned} \quad (36)$$

$$W_{И M_c}(s) \Big|_{\tilde{K}_{эсуд} = K_{эсуд} + \Delta K_{эсуд}} = \frac{\Delta U_{дс}(s)}{M_c(s)} = 0. \quad (37)$$

Аналогичным образом можно найти передаточные функции ПИО для имитации отказов вызванных изменением остальных параметров ОД. Например, для рассматриваемых выше классов: «изменение коэффициента передачи ДС» и «изменение момента сопротивления вращению ДМ» они имеют вид:

$$W_{И \varepsilon}(s) \Big|_{\tilde{K}_{дс} = K_{дс} + \Delta K_{дс}} = -\frac{\Delta K_{дс}}{K_{дс}} W_u(s); \quad (38)$$

$$W_{И M_c}(s) \Big|_{\tilde{K}_{дс} = K_{дс} + \Delta K_{дс}} = -\frac{\Delta K_{дс}}{K_{дс}} W_{M_c}(s); \quad (39)$$

$$W_{И \varepsilon}(s) \Big|_{\tilde{K}_{мс} = K_{мс} + \Delta K_{мс}} = 0; \quad (40)$$

$$W_{И M_c}(s) \Big|_{\tilde{K}_{мс} = K_{мс} + \Delta K_{мс}} = -\frac{\Delta K_{мс}}{K_{мс}} W_{M_c}(s). \quad (41)$$

Исходя из вида передаточных функций (36) – (41), с целью уменьшения вычислений в ПИО, блоки отвечающие за имитацию изменения параметров $\tilde{K}_{эсуд}$ и $\tilde{K}_{дс}$ можно включить в схему последовательно, в то время как блок отвечающий за имитацию изменения $\tilde{K}_{мс}$ целесообразнее включить в систему параллельно ДМ и ДС (рис. 8).

Работа программного имитатора отказов и диагностического обеспечения была проверена на стенде полунатурного моделирования.

Экспериментальные сигналы при введении классов отказов «изменение коэффициента передачи ЭСУД» и «изменение момента сопротивления вращению» представлены на рис. 9 и 10 соответственно. Графики были получены при подаче на вход ЭМБ линейно нарастающего входного сигнала.

Экспериментальные характеристики показывают, что при подаче на вход ЭМБ линейно нарастающего сигнала и наличии отказа оценочное значение соответствующего прямого признака отказа остается постоянным, в то время как оценочные значения остальных признаков изменяются одновременно с входным воздействием.

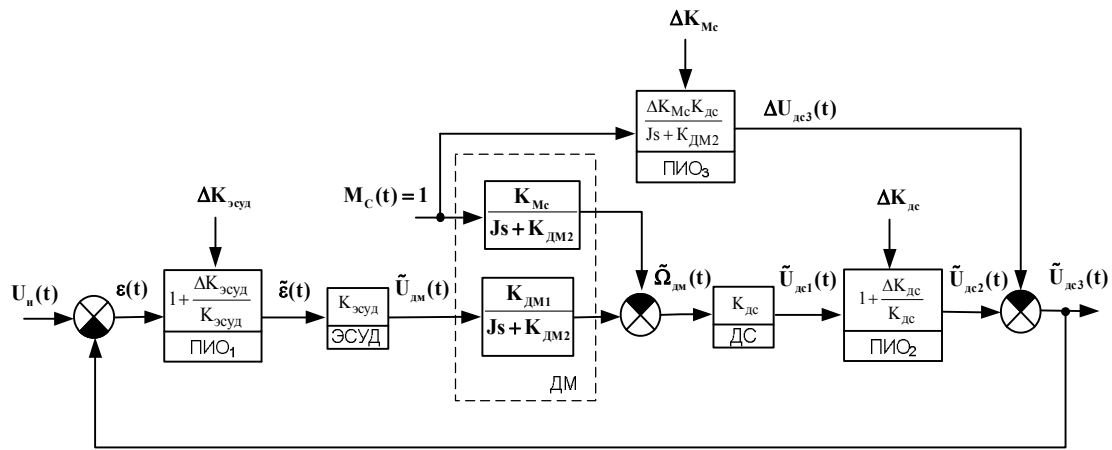


Рис. 8. Структурная схема замкнутого ЭМБ с ПИО

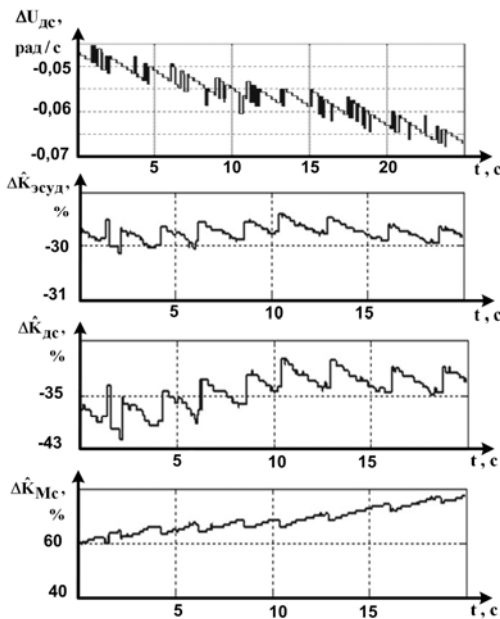


Рис. 9. Рассогласование с ЭМ ЭМБ и оценочные значения прямых признаков отказа при уменьшении $\tilde{K}_{эсуд}$

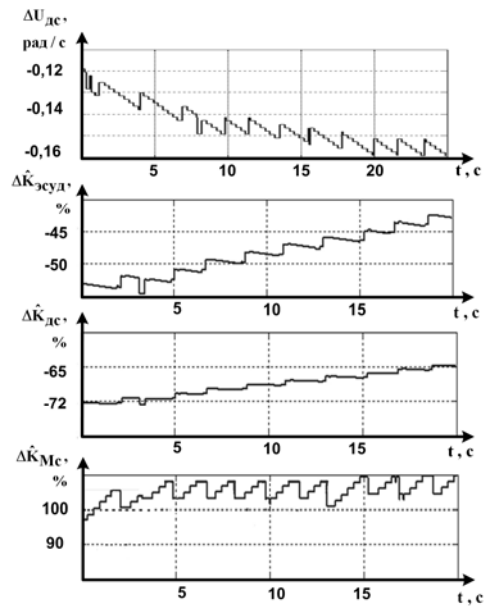


Рис. 10. Рассогласование с ЭМ ЭМБ и оценочные значения прямых признаков отказа при увеличении $\tilde{M}_с$

Для определения скорости изменения оценочных значений прямых признаков отказов при наличии помех использован метод наименьших квадратов (МНК). При этом для каждого обрабатываемого сигнала с момента подачи тестового входного сигнала до окончания времени диагностирования t_d в вычислителе формируется массивы данных $Y_i (i = \overline{1,3})$, а затем по выражениям (42) и (43) рассчитывается коэффициент наклона аппроксимирующей прямой.

$$\frac{d(\Delta\gamma_i)}{dt} \approx \frac{N \sum_{j=1}^N t(j) Y_i(j) - \sum_{j=1}^N t(j) \sum_{j=1}^N Y_i(j)}{N \sum_{j=1}^N t^2(j) - \left(\sum_{j=1}^N t(j) \right)^2}; \quad (42)$$

$$t(j) = j \cdot T_0; \quad N = t_d / T_0. \quad (43)$$

Для настройки и обработки полученных методов диагностирования функционального состояния ЭМБ было создано специализированное ПО для работы со стендом полунатурного моделирования.

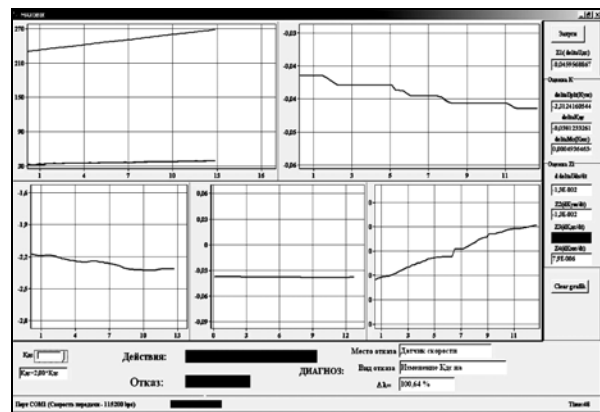


Рис. 11. Основное окно программы диагностирования функционального состояния ЭМБ

ПО позволяет по сохранным экспериментальным данным, а также в реальном времени программно имитировать и определять отказы из рассматриваемого множества.

Заключение

В работе показано теоретически и экспериментально, что использование сигнально-параметрического подхода к диагностированию функционального состояния технических объектов позволяет различать и определять величину следующих классов отказов в ЭМБ: «изменение коэффициента передачи ЭСУД», «изменение коэффициента передачи ДС», «изменение момента сопротивления вращению ДМ». При этом отсутствует необходимость в изменении структуры ЭМБ, так как для оценки состояния необходимо обрабатывать только сигнал с датчика скорости вращения ДМ. Условием различимости рассматриваемых классов отказов является наличие на входе ЭМБ изменяющегося сигнала. Информация о классе и численном значении отказа может быть использована в дальнейшем СУ для его компенсации сигнальной и параметрической подстройкой, а также реконфигурацией алгоритмов управления.

Использование ПИО, позволяет без изменения физической структуры ОД исследовать влияние различных классов отказов, а также производить отладку и настройку диагностического обеспечения. При этом отсутствует необходимость целенаправленного выведения из строя ОД и создания дополнительных сложных электромеханических устройств-имитаторов отказа.

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

ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО БЛОКУ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

С.М. Фірсов, О.М. Таран

У статті розглянуто використання сигнальний-параметричний підходу до діагностування функціонального стану електромеханічного блоку космічного апарату. Теоретично і експериментально показано, що без зміни конструкції об'єкту діагностування, по спостереженню вихідного сигналу датчика кутової швидкості обертання двигуна маховика на перехідних режимах можна розрізняти відмови, викликані зміною коефіцієнтів передачі датчика швидкості, електронної схеми управління двигуном, а також зміною моменту опору обертанню двигуна-маховика. Запропоновано використання програмних імітаторів відмов для відладки і настройки діагностичного забезпечення.

Ключові слова: космічний апарат, електромеханічний блок, двигун-маховик, управління, відмова, діагностування, сигнальний-параметричний підхід, програмний імітатор відмов.

A FUNCTIONAL STATE DIAGNOSING OF THE SPACE VEHICLE ELECTROMECHANICAL UNIT

S.N. Firsov, A.N. Taran

In the article the use is considered signal-parametric approach to diagnosing of the functional state of electromechanics block of space vehicle. In theory and it is experimentally shown that without a change the construction of object of diagnosing, on the supervision of output signal of sensor of angular speed of rotation of engine of fly-wheel on transient behaviors it is possible to distinguish refusals, caused the change of coefficients of passing to of sensor speed, electronic chart of engine management, and also by the change of moment of resistance the rotation of engine-fly-wheel. The use of programmatic imitators of refusals is offered for debugging and adjusting the diagnostic providing.

Keywords: space vehicle, electromechanics block, engine-fly-wheel, management, refusal, diagnosing, signal-parametric approach, programmatic imitator of refusals.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку моделей и методов комплексного диагностирования функционального состояния и восстановления работоспособности систем СОУП КА.

Список литературы

1. Раушенбах Б.В. Управление ориентацией космических аппаратов / Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь. – М.: Наука, 1974. – 600 с.
2. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов / А.П. Разыграев. – М.: Машиностроение, 1990. – 480 с.
3. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления: монография / А.С. Кулик – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
4. Разинькова Н.П. Обеспечение отказоустойчивости гироскопических измерителей угловых положений беспилотных самолетов: дис... канд. техн. наук: 05.13.06 / Н.П. Разинькова. – Х., 1998. – 140 с.
5. Фирсов С.Н. Обеспечение активной отказоустойчивости пневматического сервопривода беспилотного летательного аппарата: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.03 / С.Н. Фирсов. – Х., 2005. – 201 с.
6. Динамическое моделирование и испытания технических систем / И.Д. Кочубиевский, В.А. Стражмейстер, Л.В. Калиновская, П.А. Матвеев – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
7. Лученко О.А. Разработка программных имитаторов отказов для отработки аварийных режимов работы систем управления космических летательных аппаратов / О.А. Лученко, О.И. Гавриленко // Компьютерное моделирование и интеллектуальные системы: сб. науч. тр. – Запорожье: ЗНТУ, 2007. – С. 220-226.
8. Кулик А.С. Основы моделирования систем: учеб. пособие / А.С. Кулик – Х.: ХАИ, 1998. – 90 с.

Поступила в редколлегию 23.03.2010

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