

УДК 519.873 :62-50(047)

А. С. КУЛИК, д-р техн. наук,
А. П. КОЗИИ,
Н. П. ОТРАДНОВАОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ
БЛОКА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

В последние годы в авиационном приборостроении возрастает актуальность проблем, связанных с увеличением ресурса бортовых систем управления, уменьшением расходов на их эксплуатацию, повышением надежности и живучести. Один из перспективных путей решения этих проблем состоит в обеспечении отказоустойчивости систем управления. Известно несколько подходов для обеспечения отказоустойчивости: структурный, алгоритмический и системный (Кулик А. С., 1991). Проблематике отказоустойчивости датчиков посвящены работы Вагди, 1983; Ван-дер-Вельде, 1988; Паттона, 1993.

В данной работе излагаются результаты исследования по обеспечению отказоустойчивости наиболее ответственного элемента системы управления - блока гироскопических датчиков. Для решения задачи выбран системный подход (Кулик А. С., 1991), особенностью которого является совместное использование процедур глубокого диагностирования датчиков и гибкого восстановления их измерений.

Диагностические модели. Построение алгоритмов глубокого диагностирования начинается с изучения особенностей блока датчиков, исследования возможных видов отказов и синтеза диагностических моделей, отражающих виды отказов. В работе исследовался для канала курса беспилотного самолета, блок датчиков, состоящий из одного датчика угла (ДУ) курса $\psi(t)$ и двух датчиков угловой скорости (ДУС), измеряющих угловую скорость курса $\omega(t)$ (рис. 1).

Сигналы датчиков в виде напряжений через АЦП передаются в компьютер для дальнейшей обработки. При отсутствии отказов, т. е. в номинальном режиме, датчики описываются следующими уравнениями в дискретной форме:

$$U_{\psi}(k) = \text{sat} [K_{\psi} \psi(k)] + \xi_{\psi}(k); \quad (1)$$

U_{\min}
 U_{\max}

$$U_{\omega_1}(k) = \underset{\substack{U_{\min} \\ U_{\max}}}{\text{sat}} [K_{\omega_1} \omega(k) + \xi_{\omega_1}(k)]; \quad (2)$$

$$U_{\omega_2}(k) = \underset{\substack{U_{\min} \\ U_{\max}}}{\text{sat}} [K_{\omega_2} \omega(k) + \xi_{\omega_2}(k)]; \quad k \in T, \quad (3)$$

где $\text{sat}[\cdot]$ - линейная функция с ограничениями U_{\min} , U_{\max} ; K_{ψ} , K_{ω_1} , K_{ω_2} - коэффициенты передачи датчиков; ξ_{ψ} , ξ_{ω_1} , ξ_{ω_2} - ошибки измерений датчиков; T - множество номеров измерений, соответствующих периоду диагностирования.

В результате анализа видов отказов блока датчиков сформировано множество возможных классов отказов для каждого датчика $D = \{d_i\}_1^4$. Класс отказов - это группа видов отказов, характеризуемая однотипным проявлением, например, класс d_1 - обрывы - характеризуется постоянством выходного напряжения датчиков, класс d_2 - дрейфы - смещения статических характеристик датчиков, класс d_3 - изменением коэффициента передачи, а d_4 - неизвестный класс отказов. Для построения диагностических моделей произведена параметризация классов отказов d_i , $i = \overline{1,4}$. Классы отказов d_1 и d_2 описываются параметром U_0 , характеризующим смещение характеристики, а класс d_3 определяется соответствующим коэффициентом передачи: K_{ψ} , K_{ω_1} или K_{ω_2} . Тогда диагностические модели с учетом введенных параметров классов отказов имеют вид:

$$\tilde{U}_{\psi}(k) = \underset{\substack{U_{\min} \\ U_{\max}}}{\text{sat}} [K_{\psi} \psi(k) + U_0^{\psi}] + \xi_{\psi}(k); \quad (4)$$

$$\tilde{U}_{\omega_1}(k) = \underset{\substack{U_{\min} \\ U_{\max}}}{\text{sat}} [K_{\omega_1} \omega(k) + U_0^{\omega_1}] + \xi_{\omega_1}(k); \quad (5)$$

$$\tilde{U}_{\omega_2}(k) = \underset{\substack{U_{\min} \\ U_{\max}}}{\text{sat}} [K_{\omega_2} \omega(k) + U_0^{\omega_2}] + \xi_{\omega_2}(k); \quad k \in T, \quad (6)$$

В результате изучения свойств типовых отказов сформированы рабочие гипотезы:

- новые отказы в период диагностирования T не возникают;
- может отказать только один датчик;
- в каждом датчике возможны кратные отказы;

- характер изменения входных сигналов $\psi(t)$ и $\omega(t)$ обеспечивает выявление любого класса отказа из заданного множества D.

Обнаружение отказов. Задача обнаружения, состоящая в установлении факта работоспособности или неработоспособности блока датчиков, решается с помощью формирования алгебраического соотношения из измерений $U_\psi(k)$, $U_{\omega_1}(k)$ и $U_{\omega_2}(k)$, приведенных ко входу, а также условия функциональной взаимосвязи измерений ($\dot{\psi}(t)=\omega(t)$, где t - непрерывное время):

$$\Delta_U = |0.5 K_\psi T_0 (U_{\omega_1}(k) K_{\omega_2} + K_{\omega_1} U_{\omega_2}(k)) -$$

$$K_{\omega_1} K_{\omega_2} (\hat{U}_\psi(k+1) - \hat{U}_\psi(k)) | \leq \delta_1, \quad (7)$$

где T_0 - такт квантования непрерывных измерений; δ_1 - допуск; $\hat{U}_\psi(k)$ - оценочное значение напряжения.

Для компьютерной реализации диагностической процедуры удобно использовать ее представление в форме дихотомического дерева с бинарными признаками λ_1 в узлах, которые являются результатами решения двузначных предикатных уравнений. Для задачи обнаружения отказа в блоке датчиков бинарный признак λ_1 имеет вид:

$$\lambda_1 = S_2 \{ \Delta_U \leq \delta_1 \}; \quad (8)$$

значение которого вычисляется на массиве Δ_U с использованием коэффициента доверия p_1 , позволяющего отбраковывать ложные, зашумленные измерения и сбои.

Поиск отказавшего датчика. Эта задача заключается в нахождении в блоке датчиков отказавшего и решается сравнением текущих измерений с оценочными и допусковой обработкой результатов сравнения. Сформированы следующие бинарные признаки:

$$\lambda_2 = S_2 \{ |\hat{U}_\psi(k) - \hat{U}'_\psi(k)| \leq \delta_2 \} \text{ с коэфф. доверия } p_2; \quad (9)$$

$$\lambda_3 = S_2 \{ |\hat{U}_\psi(k) - \hat{U}''_\psi(k)| \leq \delta_3 \} \text{ с коэфф. доверия } p_3, \quad (10)$$

где $\hat{U}'_\psi(k)$ и $\hat{U}''_\psi(k)$ - оценочные значения напряжения ДУ, вычисленные через $\hat{U}_{\omega_1}(k)$ и $\hat{U}_{\omega_2}(k)$ соответственно, например, путем численного интегрирования по формуле прямоугольников:

$$\hat{U}'_\psi(k+1) = \hat{U}'_\psi(k) + K_\psi T_0 \hat{U}_{\omega_1}(k) / K_{\omega_1}. \quad (11)$$

Процедуру поиска можно представить в виде фрагмента дихо-

томического дерева (рис. 2). Возможные исходы поиска: "N"
 - блок функционирует нормально; "ДУ", "ДУС1", "ДУС2"
 - отказавший датчик ДУ, ДУС1 или ДУС2 соответственно.

Определение класса отказа. Так как класс отказа характеризуется единственным параметром, то задача определения классов отказов заключается в выборе косвенных диагностических признаков, используя которые можно однозначно выявить класс отказа. Так, например, для обрывов в ДУ, характеризующихся постоянством выходного напряжения, бинарный признак λ_4 имеет вид:

$$\lambda_4 = S_2(|\hat{U}_\psi(k) - \hat{U}_\psi(k+m)| \leq \delta_4) \text{ с коэфф. доверия } p_4, \quad (12)$$

где m - некоторое целое число итераций, а для дрейфов в ДУС1, характеризующихся постоянным смещением сигнала, λ_5 описывается следующим предикатным уравнением:

$$\lambda_5 = S_2(|\Delta U_{\omega_1}(k) - \Delta U_{\omega_1}(k+m)| \leq \delta_5) \text{ с коэфф. доверия } p_5, \quad (13)$$

где $\Delta U_{\omega_1}(k) = \hat{U}_{\omega_1}(k) - \hat{U}_{\omega_1}(k)$, а $\hat{U}_{\omega_1}(k)$ - вычисляется путем численного дифференцирования показаний ДУ. Аналогично получают бинарные признаки для остальных классов отказов. В результате решения описанных задач, формируется дихотомическое дерево, являющееся основой для программной реализации.

Восстановление измерений. Построение алгоритмов восстановления измерений датчиков состоит в гибком использовании имеющихся средств приборной и алгоритмической избыточности. Приборная избыточность реализована двумя датчиками угловых скоростей, а алгоритмическая - функциональной взаимосвязью ДУ с ДУСами, а также наличием средств сигнальной и параметрической компенсации неправильных измерений. Например, если в ДУС2 - отказ из класса дрейфов, а величина дрейфа U_0 вычисляется при диагностировании с использованием показаний исправных датчиков, то сигнал восстанавливается вычитанием U_0 из текущих показаний:

$$\hat{U}_{\omega_2}(k) = \hat{U}_{\omega_2}(k) - U_0. \quad (14)$$

Если отказ в ДУ, а ДУС1 исправен, то показания восстанавливаются по формуле (11). В случае переориентации ДУС1 можно восстановить его измерения путем изменения знака выходного сигнала:

$$\hat{U}_{\omega_1}(k) = -\hat{U}_{\omega_1}(k) \quad (15)$$

Описанная схема обеспечения отказоустойчивости исследована с помощью натурального эксперимента в реальном масштабе времени на

лабораторном стенде блока гироскопических датчиков по каналу курса. Эксперимент проводился для произвольного входного сигнала, где измерения производились в течение 7-ми секунд с шагом $T_0=0.1$ с, с помехой типа белый шум (дисперсия 0.3 В). На рис.3 изображен график изменения напряжения на ДУ. С момента начала эксперимента датчики функционируют нормально, через 2 секунды введен отказ - дрейф величиной 2 В в ДУ, который проявился смещением характеристики относительно оценочной. С помощью разработанных программ диагностирования отказ обнаружен на 3-й секунде. Место отказа (ДУ) и его класс (дрейф) определены соответственно через 3.2 и 3.7 секунды с момента начала эксперимента. Восстановление сигнала осуществлено через 4 секунды разработанными программами восстановления.

Были рассмотрены 62 ситуации возможных появлений отказов (в т.ч. и кратных) в трех датчиках, причем восстанавливаемыми или частично восстанавливаемыми на элементном уровне оказались 33 ситуации. Период диагностирования и восстановления 1.5 - 2 секунды. Измерения в остальных 29 ситуациях могут быть восстановлены на системном уровне.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности и практической целесообразности используемого подхода для повышения отказоустойчивости БГД.

Список используемых источников

1. Вагди М.Н. (1983). Применение адаптивных систем управления для обнаружения и отключения неисправных датчиков. Аэрокосмическая техника, № 2, с.155-160.
2. Ван-дер-Вельде У.Э., Массоумниа М.А. (1988). Формулировка соотношений паритетности для обнаружения и идентификации неисправностей в системе управления. Аэрокосмическая техника, № 1, с.87-94.
3. Кулик А.С. (1991). Обеспечение отказоустойчивости систем управления. Харьков: Харьковский авиационный институт. 90с.
4. Patton R.J. (1993). Robustness issues in fault-tolerant control. Inten. Conf. on Fault Diagnosis TOOLDIAG'93, Toulouse, France, Vol. 3, late papers.

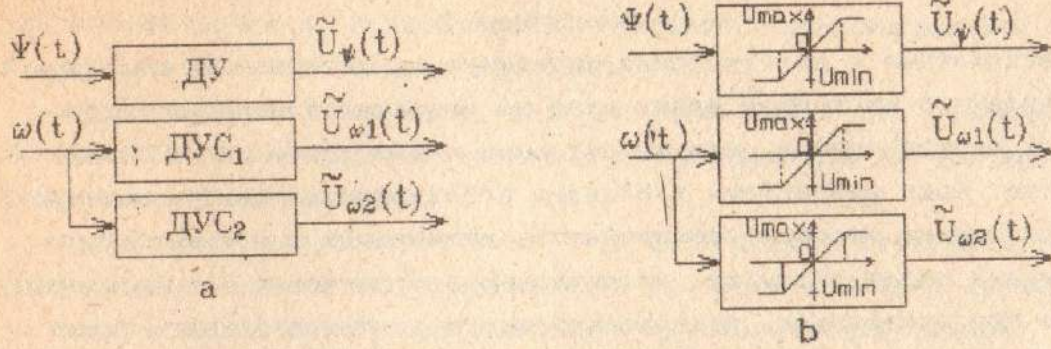


Рис.1 а- функциональная схема; б- структурная схема.

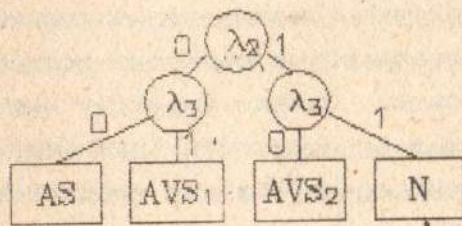


Рис.2. Фрагмент дихотомического дерева

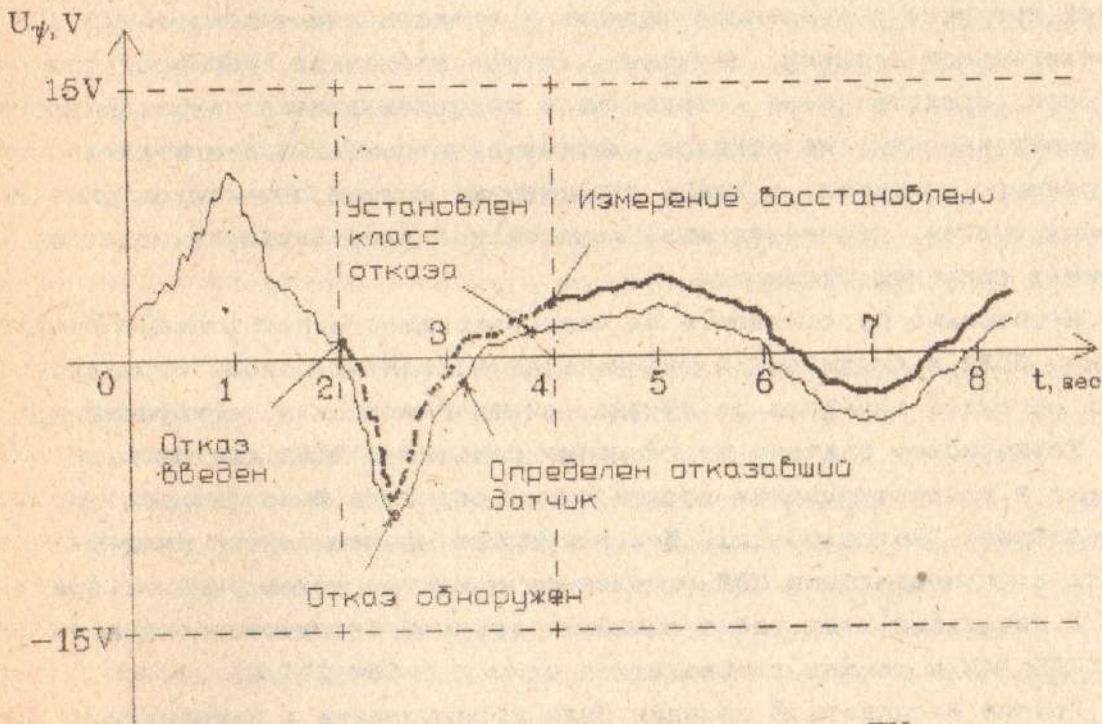


Рис.3. Процесс восстановления для ДУ.