

УДК 681.5.015:629.7.05

ДО КУОК ТУАН<sup>1</sup>, С.Н. ФИРСОВ<sup>2</sup>, О.А. ПИЩУХИНА<sup>3</sup><sup>1</sup> Ханойская авиатехническая Академия, Вьетнам<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>3</sup> Национальный университет радиозлектроники, Харьков, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЛОКА ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО САМОЛЕТА С ГЛУБИНОЙ ДО МЕСТА ОТКАЗА

*Разработано диагностическое обеспечение блока датчиков угловой скорости системы управления многоцелевого самолета, которое позволяет определять техническое состояние блока с глубиной до места отказа. Доказана возможность идентификации мест отказов при различных условиях возникновения отказов, отличающихся классом, местом и кратностью. Показано преимущество перспективного размещения датчиков в блоке в сравнении с базовым, а также показана особенность диагностирования такого размещения, заключающаяся в применении сигнально-параметрического подхода для диагностирования технического состояния блока с глубиной до места отказа при возникновении кратных отказов в подгруппе. В последующем полученная информация о техническом состоянии может быть использована для решения последующих задач диагностического обеспечения – определения класса и вида отказа.*

**Ключевые слова:** отказоустойчивость, диагностирование, навигация, акселерометр, датчик угловой скорости, сигнальное диагностирование, параметрическое диагностирование, диагностическая модель.

### Введение

На многоцелевых самолетах в контурах демпфирования и стабилизации применяется избыточное количество однотипных датчиков угловых скоростей (ДУС), расположенных следующим образом: три параллельных оси  $Ox$ , связанной с корпусом ЛА системы координат, три параллельно оси  $Oy$  и четыре параллельно оси  $Oz$ . С точки зрения формирования измерительного базиса такое количество измерителей должно обеспечивать парирование семикратных полных отказов ДУС, однако располагаемое размещение датчиков позволяет реализовывать традиционные мажоритарные подходы по схеме два из трех, относительно каждой оси без возможности применения перекрестных избыточностей. Нерациональное использование избыточных измерительных средств в контурах демпфирования определяет актуальность применения перспективного системного подхода к обеспечению отказоустойчивости избыточного блока ДУС многоцелевого самолета, базирующегося на принципах глубокого диагностирования технического состояния измерителей и гибкого восстановления их работоспособности по результатам анализа.

Предлагаемое расположение измерителей в блоке ДУС многоцелевого самолета, не требующее изменения исходного количества датчиков, позволяет не только решать задачи глубокого диагностирования, но

и обеспечивает функционально устойчивое измерение угловой скорости [1]. Таким образом, обеспечение функциональной устойчивости блока ДУС является одной из актуальных задач для получения достоверной информации о значениях составляющих вектора угловой скорости.

### 1. Определение технического состояния блока ДУС с глубиной до места отказа при наличии однократного отказа в подгруппе блока

Независимо от применяемого подхода для определения технического состояния блока ДУС при решении задачи обнаружения отказа в системах с известным входом для него характерно следующее: воспроизведение эталонного поведения объекта диагностирования; сравнение контролируемых переменных с эталонными; формирования допусков для результатов сравнения; классификационная обработка результатов сравнения [3]. ДУС не относится к объектам с известным входом, поэтому для решения задачи обнаружения отказа применим подход, основанный на применении аппаратной или функциональной избыточностей с использованием косвенных измерений – применение избыточных переменных, выбор которых основан на наличии перекрестных связей. Так в работе [1] получены следующие аналитические выражения

для описания преобразовательных свойств соответствующих ДУС относительно осей связанной системы координат (рис.1):

– для оси Oх (подгруппа X):

$$\tilde{U}_{x1}(t) = k\omega_x(t); \tilde{U}_{x2}(t) = k\omega_x(t); \tilde{U}_{x3}(t) = k\omega_x(t); (1)$$

– для оси Oу (подгруппа Y):

$$\tilde{U}_{y1}(t) = k\omega_y(t); \tilde{U}_{y2}(t) = k\omega_y(t); \tilde{U}_{y3}(t) = k\omega_y(t); (2)$$

– для оси Oz (подгруппа Z):

$$\tilde{U}_{z1}(t) = k\omega_z(t); \tilde{U}_{z2}(t) = k\omega_z(t); \tilde{U}_{z3}(t) = k\omega_z(t); (3)$$

– для оси коллинеарной диагонали куба (OO’):

$$\tilde{U}_0(t) = k \frac{1}{\sqrt{3}} (\omega_x(t) + \omega_y(t) + \omega_z(t)). (4)$$

Выражения (1) – (4) представляют собой математические модели номинального поведения ДУС соответствующей подгруппы, соответственно, модели, возмущенные отказом примут вид:

$$\tilde{U}_{ij}(t) = k\omega_i(t) + \Delta U_{0j}, (5)$$

где i – (x,y,z) индекс соответствующей оси связанной системы координат (x,y,z); j – номер датчика;  $\Delta U_{0j}$  – отклонение j-ого датчика, вызванное наличием в датчике того или иного вида отказа [3].

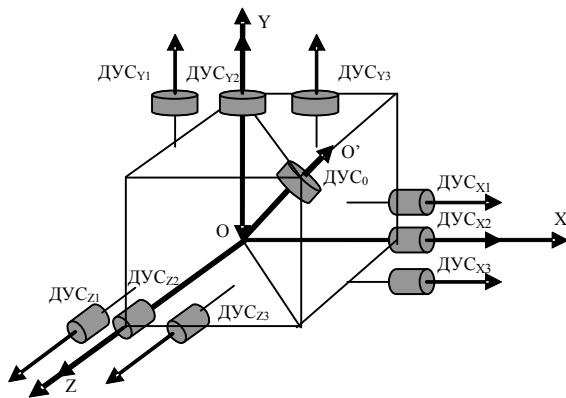


Рис. 1. Альтернативное расположение ДУС

Альтернативное расположение ДУС позволяет формировать процедуры обнаружения отказа, применяя подходы мажоритарной схемы расположения датчиков в каждой подгруппе. Подгруппа датчиков относительно оси OX содержит ДУСx1, ДУСx2, ДУСx3; Подгруппа датчиков относительно оси OY содержит ДУСy1, ДУСy2, ДУСy3; Подгруппа датчиков относительно оси OZ содержит ДУСz1, ДУСz2, ДУСz3. Такие подгруппы одинаковы по количеству, типу и способу размещения датчиков, следовательно, для данной задачи достаточно исследовать одну подгруппу, например, X.

Пусть в ДУСx1 и ДУСx3 нет отказа, а в ДУСx2 возник неопределенный отказ. Тогда, исходя из (1) и

(5) математические модели номинального и аварийного функционирования ДУС в подгруппе X равны:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{x1}(t) &= k\omega_x(t); \tilde{U}_{x2}(t) = k\omega_x(t) + \Delta U_{02}; \\ \tilde{U}_{x3}(t) &= k\omega_x(t). \end{aligned} (6)$$

Анализ зависимостей (6) показывает, что значение выходного сигнала ДУСx2 отличается от значений ДУСx1 и ДУСx3, что позволяет сформировать предикатные уравнения обнаружения места отказа в подгруппе X:

$$\begin{aligned} z_{1X} &= S_{1X} \{ |\Delta_{1X} = \tilde{U}_{x1}(t) - \tilde{U}_{x2}(t)| > \delta_0 \} = \\ &= \begin{cases} 0 - \text{нет отказа;} \\ 1 - \text{отказ ДУСx1 или ДУСx2;} \end{cases} \end{aligned} (7)$$

$$\begin{aligned} z_{2X} &= S_{2X} \{ |\Delta_{2X} = \tilde{U}_{x2}(t) - \tilde{U}_{x3}(t)| > \delta_0 \} = \\ &= \begin{cases} 0 - \text{нет отказа;} \\ 1 - \text{отказ ДУСx2 или ДУСx3;} \end{cases} \end{aligned} (8)$$

$$\begin{aligned} z_{3X} &= S_{3X} \{ |\Delta_{3X} = \tilde{U}_{x3}(t) - \tilde{U}_{x1}(t)| > \delta_0 \} = \\ &= \begin{cases} 0 - \text{нет отказа;} \\ 1 - \text{отказ ДУСx3 или ДУСx1;} \end{cases} \end{aligned} (9)$$

где  $\delta_0$  – допуск, который определяется как максимальная по модулю разность всех значений напряжения всех датчиков при измерении одной величины угловой скорости в номинальном режиме.

Двузначные предикаты  $S_1, S_2$  и  $S_3$  описывают процесс сравнения показаний датчиков попарно. Если значение какого-либо предиката равно 1, то это соответствует наличию отказа в соответствующей паре датчиков, если равно 0 – пара функционирует нормально. На основании (7) – (9) формируется предикатное уравнение обнаружения отказов в подгруппе X:

$$\begin{aligned} z_{4X} &= S_{4X} \{ (|\Delta_{1X}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{2X}| > \delta_0) \} = \\ &= \begin{cases} 0 - \text{нет отказа в подгруппе;} \\ 1 - \text{отказ в подгруппе.} \end{cases} \end{aligned} (10)$$

Аналогичным образом формируются предикатные уравнения определения мест отказов в остальных подгруппах:  $z_{1Y}, z_{2Y}, z_{3Y}, z_{4Y}, z_{1Z}, z_{2Z}, z_{3Z}, z_{4Z}$ . Отметим тот факт, что если  $z_{4X} = z_{4Y} = z_{4Z} = 0$ , то это соответствует тому, что в каждой подгруппе отказ отсутствует, а номинальное значение работы подгрупп примет вид:

$$U_0(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{x1}(t) + U_{y1}(t) + U_{z1}(t)), (11)$$

где i, j, k = (1, 2, 3) – индексы выходных напряжений датчиков в подгруппах.

На основании (11) сформировано предикатное уравнение для обнаружения отказа в ДУС<sub>0</sub> :

$$z_5 = S_5 \left\{ \Delta_0 = \tilde{U}_0(t) - \hat{U}_0(t) > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа в блоке;} \\ 1 - \text{отказ ДУС}_0. \end{cases} \quad (12)$$

Для решения задачи полного покрытия, при обнаружении отказов в блоке, достаточно использовать следующие предикатные уравнения:

$$z_0 = S_0 \{ A \vee B \vee C \vee (\Delta_0 > \delta_0) \} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа;} \\ 1 - \text{отказ в блоке,} \end{cases} \quad (13)$$

где  $A = (|\Delta_{1X}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{2X}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{3X}| > \delta_0)$ ;

$B = (|\Delta_{1Y}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{2Y}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{3Y}| > \delta_0)$ ;

$C = (|\Delta_{1Z}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{2Z}| > \delta_0) \vee (|\Delta_{3Z}| > \delta_0)$ .

Полученные предикатные уравнения позволят разработать алгоритм диагностического обеспечения блока ДУС с глубиной до места отказа (рис. 2).

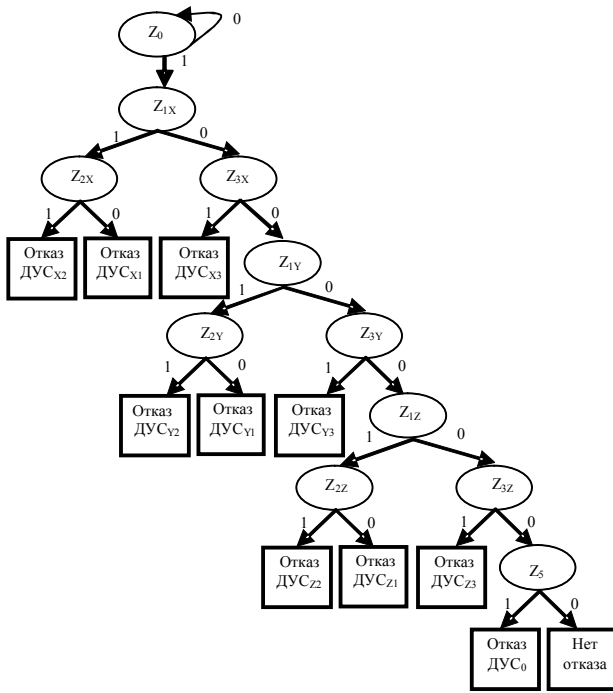


Рис. 2. Дихотомическое дерево диагностического обеспечения поиска места отказа при однократном отказе в блоке ДУС

Проведенные исследования показали, что три подгруппы обладают одинаковой возможностью обнаружения отказа, т.е. данная схема размещения позволяет обнаружить однократные отказы в каждой подгруппе. На рис. 3 представлено полное дихотомическое дерево определения места отказа в блоке ДУС, декомпозированное на подгруппы.

## 2. Определение технического состояния блока ДУС с глубиной до места отказа при наличии кратных отказов в подгруппах блока

Проведенный анализ компоновки ДУС в блоке показал, что наличие в нем ДУС<sub>0</sub>, позволяет обнаружить однократные отказы в подгруппах, что на сегодня является тривиальной задачей. Необходимо исследовать варианты компоновки ДУС в блоке, позволяющие диагностировать кратные отказы в блоке. Рассмотрим случай, когда в блоке ДУС имеют место два отказа, которые возникли одновременно в различных подгруппах и вызвали разные отклонения невязок от номинального значения.

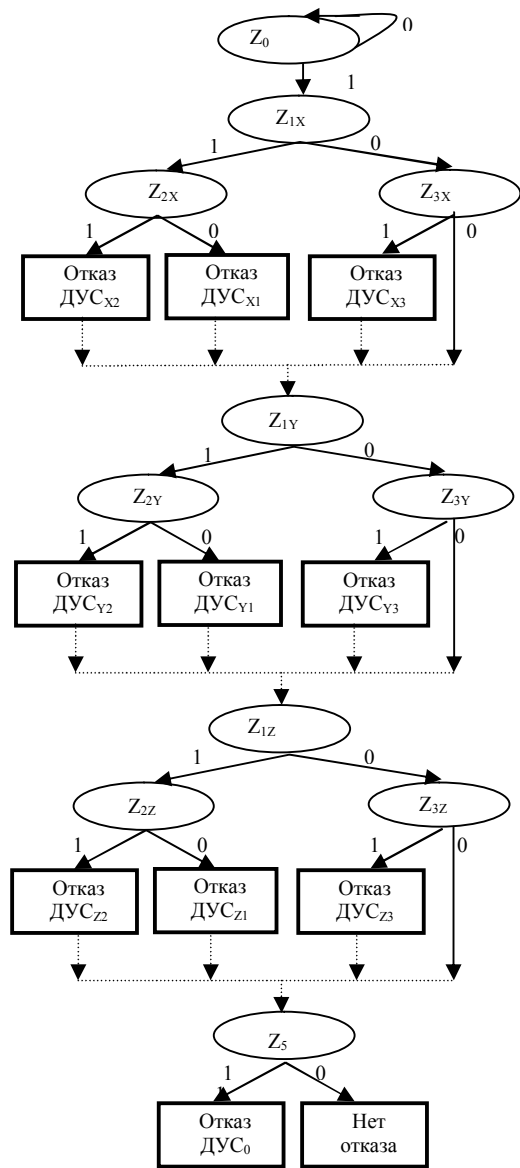


Рис. 3. Декомпозированное по подгруппам дихотомическое дерево диагностического обеспечения поиска места отказов в блоке ДУС

С учетом введенных предположений предикаты  $z_{1X}, z_{2X}, z_{3X}$  примут вид:

$$z_{1X} = S_1 \left\{ \left| \Delta_1 = \tilde{U}_{X1}(t) - \tilde{U}_{X2}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа в ДУС}_{X1} \text{ и ДУС}_{X2}; \\ 1 - \text{отказ ДУС}_{X1} \vee \text{ДУС}_{X2} \vee \text{обоих ДУС}; \end{cases} \quad (14)$$

$$z_{2X} = S_2 \left\{ \left| \Delta_2 = \tilde{U}_{X2}(t) - \tilde{U}_{X3}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа ДУС}_{X2} \wedge \text{ДУС}_{X3}; \\ 1 - \text{отказ ДУС}_{X2} \vee \text{ДУС}_{X3} \vee \text{обоих ДУС}; \end{cases} \quad (15)$$

$$z_{3X} = S_3 \left\{ \left| \Delta_3 = \tilde{U}_{X3}(t) - \tilde{U}_{X1}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа ДУС}_{X3} \wedge \text{ДУС}_{X1}; \\ 1 - \text{отказ ДУС}_{X3} \vee \text{ДУС}_{X1} \vee \text{обоих ДУС}. \end{cases} \quad (16)$$

Аналогичным образом формируются и предикатные уравнения:  $z_{1Y}, z_{2Y}, z_{3Y}, z_{4Y}, z_{1Z}, z_{2Z}, z_{3Z}, z_{4Z}$ .

Анализ полученных предикатных уравнений показывает, что первоначальное размещение датчиков в блоке не позволяет обнаружить место возникновения кратного отказа. Это подтверждается тем, что при возникновении двух- и трехкратных отказов в различных подгруппах все предикаты принимают значения 1, например: пусть в датчиках ДУС<sub>X1</sub>, ДУС<sub>X2</sub> возникли отказы, тогда  $z_{1X} = z_{2X} = z_{3X} = 1$ , а, следовательно, исходя из сформированного дихотомического дерева для однократного отказа, последний не будет идентифицирован. Для устранения этого недостатка необходимо воспользоваться располагаемыми перекрестными информационными связями, которые имеют место при перспективном расположении ДУС в избыточном блоке на борту многоцелевого самолета (рис.1) и при анализе следующего предикатного уравнения:

$$z_{5m} = S_{5m} \left\{ \left| \Delta_0 = \tilde{U}_0(t) - \hat{U}_{0m}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа в } i, j, k \text{ -ых датчиках}; \\ 1 - \text{отказ в } i, j, k \text{ -ых датчиках } \wedge \text{ДУС}_0, \end{cases} \quad (17)$$

где  $m = 1 \dots 3^3 = 1 \dots 27$  – индекс, соответствующий номеру перебора выходных показаний датчиков;  $i, j, k = (1, 2, 3)$ .

Анализ предикатных уравнений  $z_{1X}, z_{2X}, z_{3X}, z_{4X}, z_{1Y}, z_{2Y}, z_{2Z}, z_{3Y}, z_{4Y}, z_{1Z}, z_{3Z}, z_{4Z}$  и  $z_{5m}, (m = 1 \dots 27)$  позволил сформировать следующие заключения:

- если все 27 предикатов  $z_{5m}, (m = 1 \dots 27)$ , (при полном переборе) принимают значение 1, а остальные предикаты  $z_{1X}, z_{2X}, z_{3X}, z_{4X}, z_{1Y}, z_{2Y}, z_{3Y}, z_{4Y},$  и  $z_{1Z}, z_{2Z}, z_{3Z}, z_{4Z}$  равны 0, то допустимо принятие решения наличия отказа в ДУС<sub>0</sub>;

- если все 27 предикатов  $z_{5m}, (m = 1 \dots 27)$  (при полном переборе) принимают значение 1, а предикаты  $z_{1X}, z_{2X}, z_{3X}, z_{4X}, z_{1Y}, z_{2Y}, z_{3Y}, z_{4Y},$  равны 0 и  $z_{1Z}, z_{2Z}, z_{3Z}, z_{4Z}$  равны 1, то отказ имеет место во всех трех датчиках ДУС<sub>Z</sub>;

- если имеет место отказ в одном датчике подгруппы, то 9 предикатов  $z_{5m}$  принимают значение 1;

- если имеет место двукратный отказ в подгруппе, то 18 предикатов  $z_{5m}$  принимают значение 1.

Для построения дихотомического дерева определения места отказа в подгруппе при наличии кратных отказов сформирована таблица:

Таблица 1

Таблица влияния отказов на значения предикатов

$z_{5m}$	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$z_{5m}$	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$z_{5m}$	$U_x$	$U_y$	$U_z$
1	1	1	1	10	2	1	1	19	3	1	1
2	1	1	2	11	2	1	2	20	3	1	2
3	1	1	3	12	2	1	3	21	3	1	3
4	1	2	1	13	2	2	1	22	3	2	1
5	1	2	2	14	2	2	2	23	3	2	2
6	1	2	3	15	2	2	3	24	3	2	3
7	1	3	1	16	2	3	1	25	3	3	1
8	1	3	2	17	2	3	2	26	3	3	2
9	1	3	3	18	2	3	3	27	3	3	3

В табл. 1 показан набор вариантов использования выходных показаний датчиков по индексам  $i, j, k = (1, 2, 3)$  для определения значения предиката  $z_5$  (17). Число в столбце  $z_{5m}$  означает номер варианта выбора, а числа в столбцах  $U_x, U_y$  или  $U_z$  – номер датчика в подгруппе.

Полученные результаты позволили сформировать дихотомическое дерево определения места отказа в подгруппе при появлении кратных отказов (рис.4).

На рис.4. показаны значения состояния S, которые формируются в результате проверки значений предикатов в каждой подгруппе. Следовательно, при проверке предикатов в каждой подгруппе будет иметь место одно из четырех состояний. Следует указать на тот факт, что при получении состояний, соответствующих случаю  $z_{4X} = z_{4Y} = z_{4Z} = 0$ , а  $z_0=1$  говорит о том, что отказ возник в ДУС<sub>0</sub>. Также справедлива и обратная ситуация: если ДУС<sub>0</sub> исправен, то на основании полученных значений состояния S, соответствующих трем подгруппам, определяются предикаты, значение которых необходимо определить с целью снятия неопределенности места возникновения кратных отказов.

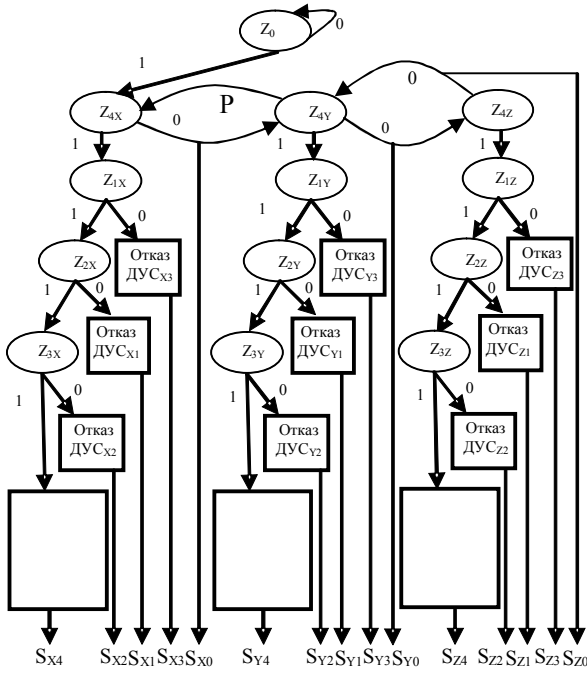


Рис. 4. Дихотомическое дерево определения места отказа в подгруппе при появлении кратных отказов

Для полного диагностирования до места отказов в блоке необходимо анализировать значения следующих предикатов:

$$z_{5\_2} = S_{5\_2} \left\{ \begin{array}{l} \Delta_0 = \tilde{U}_0(t) - \hat{U}_{0\_2}(t) > \delta_0 \\ 0 - \text{нет отказа в ДУС}_{X1}; \\ 1 - \text{отказ в ДУС}_{X1}; \end{array} \right. \quad (18)$$

$$U_{0\_2}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{x1}(t) + U_{y1}(t) + U_{z2}(t));$$

$$z_{5\_10} = S_{5\_10} \left\{ \begin{array}{l} \Delta_0 = \tilde{U}_0(t) - \hat{U}_{0\_10}(t) > \delta_0 \\ 0 - \text{нет отказа в ДУС}_{X2}; \\ 1 - \text{отказ в ДУС}_{X2}; \end{array} \right. \quad (19)$$

$$U_{0\_10}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{x2}(t) + U_{y1}(t) + U_{z2}(t));$$

$$z_{5\_20} = S_{5\_20} \left\{ \begin{array}{l} \Delta_0 = \tilde{U}_0(t) - \hat{U}_{0\_20}(t) > \delta_0 \\ 0 - \text{нет отказа в ДУС}_{X3}; \\ 1 - \text{отказ в ДУС}_{X3}; \end{array} \right. \quad (20)$$

Дополняя табл.1 значения предикатов (18) – (20), исключая вариант  $z_{4X} = z_{4Y} = z_{4Z} = 0$ , получили табличную диагностическую модель определения кратных отказов.

Таблица 2  
Табличная диагностическая модель

Полученные варианты при полной проверке			Предикатные варианты в таблице 1., необходимы для полного диагностирования в блоке	Выбранный исправный датчик для проверки		
S <sub>x<sub>i</sub></sub> (i=0,4) гр. X	S <sub>y<sub>i</sub></sub> (j=0,4) гр. Y	S <sub>z<sub>k</sub></sub> (k=0,4) гр. Z		гр. X	гр. Y	гр. Z
4	4	4	1, 2, ..., 27			
4	4	2	1,4,7,10,13,16,19,21,24,27	-	-	1
4	4	1	2,5,8,11,14,17,20,23,26	-	-	2
4	4	3	1,4,7,10,13,16,19,21,24,27	-	-	1
4	4	0	1,4,7,10,13,16,19,21,24,27	-	-	1
4	2	4	1,2,3,10,11,12,19,20,21	-	1	-
4	2	2	1,10,19	-	1	1
4	2	1	2,11,20	-	1	2
4	2	3	1,10,19	-	1	1
4	2	0	1,10,19	-	1	1
4	1	4				
....	....	....	....	....	....	....
4	3	1	2,11,20	-	1	2
....	....	....	....	....	....	....
2	3	1	Отказ ДУС <sub>X2</sub> , ДУС <sub>Y3</sub> , ДУС <sub>Z1</sub>	-	-	-
2	3	3	Отказ ДУС <sub>X2</sub> , ДУС <sub>Y3</sub> , ДУС <sub>Z3</sub>	-	-	-
....	....	....	....	....	....	....
0	0	3	Отказ ДУС <sub>Z3</sub>	1	1	1
0	0	0	Нет отказа	1	1	1

Для определения дополнительных предикатных соотношений в табл.1, с целью решения задачи определения места кратного отказа, необходимо определить исправные датчики в каждой подгруппе, а затем выбирать для сравнения произвольные в каждой подгруппе в соответствии с правыми столбцами табл. 2. и сравнивать с соответствующими значениями табл.1 с целью определения требуемых номеров вариантов для дальнейшей проверки. Если индекс в табл. 2 больше четырех, то, соответственно, увеличивается количество предикатных уравнений, необходимых для решения задачи определения места отказа. Для каждой строки, не имеющей индекс «4», отказы в блоке уже определены заранее, поэтому остается проверить строки, которые имеют индекс «4». Применяя предложенный подход, сформирована унифицированная табличная диагностическая модель, представленная в виде табл. 3.

Таблица 3  
Унифицированная табличная диагностическая модель

Полученные варианты при полной проверке				Предикатные варианты (табл. 1), необходимы для диагностирования блока	Исправный датчик для проверки		
№	S <sub>x<sub>i</sub></sub>	S <sub>y<sub>i</sub></sub>	S <sub>z<sub>k</sub></sub>		X	Y	Z
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4	4	4	1, 2, ..., 27			
2	4	4	2	1,4,7,10,13,16,19,21,24,27	-	-	1
3	4	4	1	2,5,8,11,14,17,20,23,26	-	-	2
4	4	4	3	1,4,7,10,13,16,19,21,24,27	-	-	1
5	4	4	0	1,4,7,10,13,16,19,21,24,27	-	-	1

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
6	4	2	4	1,2,3,10,11,12,19,20,21	-	1	-
7	4	2	2	1,10,19	-	1	1
8	4	2	1	2,11,20	-	1	2
9	4	2	3	1,10,19	-	1	1
10	4	2	0	1,10,19	-	1	1
11	4	1	4	4,5,6,13,14,15,22,23,24	-	2	-
12	4	1	2	4,13,22	-	2	1
13	4	1	1	5,14,23	-	2	2
14	4	1	3	5,14,23	-	2	2
15	4	1	0	5,14,23	-	2	2
16	4	3	4	1,2,3,10,11,12,19,20,21	-	1	-
17	4	3	2	1,10,19	-	1	1
18	4	3	1	2,11,20	-	1	2
19	4	3	3	1,10,19	-	1	1
20	4	3	0	1,10,19	-	1	1
21	4	0	4	1,2,3,10,11,12,19,20,21	-	1	-
22	4	0	2	1,10,19	-	1	1
23	4	0	1	2,11,20	-	1	2
24	4	0	3	1,10,19	-	1	1
25	4	0	0	1,10,19	-	1	1
26	2	4	4	1,2,3,4,5,6,7,8,9	1	-	-
27	2	4	2	1,4,7	1	-	1
28	2	4	1	2,5,8	1	-	2
29	2	4	3	1,4,7	1	-	1
30	2	4	0	1,4,7	1	-	1
31	1	4	4	10,11,12,13,14,15,16,17,18	2	-	-
32	1	4	2	10,13,16	2	-	1
33	1	4	1	11,14,17	2	-	2
34	1	4	3	10,13,16	2	-	1
35	1	4	0	10,13,16	2	-	1
36	3	4	4	1,2,3,4,5,6,7,8,9	1	-	-
37	3	4	2	1,4,7	1	-	1
38	3	4	1	2,5,8	1	-	2
39	3	4	3	1,4,7	1	-	1
40	3	4	0	1,4,7	1	-	1
41	0	4	4	1,2,3,4,5,6,7,8,9	1	-	-
42	0	4	2	1,4,7	1	-	1
43	0	4	1	2,5,8	1	-	2
44	0	4	3	1,4,7	1	-	1
45	0	4	0	1,4,7	1	-	1
46	2	2	4	1,2,3	1	1	-
47	2	1	4	4,5,6	1	2	-
48	2	3	4	1,2,3	1	1	-
49	2	0	4	1,2,3	1	1	-
50	1	2	4	10,11,12	2	1	-
51	1	1	4	13,14,15	2	2	-
52	1	3	4	10,11,12	2	1	-
53	1	0	4	10,11,12	2	1	-
54	3	2	4	10,11,12	2	1	-
55	3	1	4	13,14,15	2	2	-
56	3	3	4	10,11,12	2	1	-
57	3	0	4	10,11,12	2	1	-
58	0	2	4	10,11,12	2	1	-
59	0	1	4	13,14,15	2	2	-
60	0	3	4	10,11,12	2	1	-
61	0	0	4	10,11,12	2	1	-

Применяя табл. 2 и 3, процедуру диагностирования места отказов легко разбить на два этапа.

Этап 1. Определяется наличие однократного отказа в подгруппе путем проверки значений  $z_0, z_{1X},$

$z_{2X}, z_{3X}, z_{4X}, z_{1Y}, z_{2Y}, z_{3Y}, z_{4Y}, z_{1Z}, z_{2Z}, z_{3Z}, z_{4Z}$  (рис. 4). Если полученные результаты принимают соответствующие состояния  $S_{i4}, (i = x, y, z)$ , то при этом процесс диагностирования завершается, и формируются результаты диагностирования блока. Если хотя бы одно из состояний  $S_{i4}, (i = x, y, z)$  не удовлетворяет сформированным критериям, процедура переходит ко второму этапу.

Этап 2. Этот этап позволяет снимать неопределенность, связанную с появлением кратных отказов в блоке ДУС путем проверки необходимых предикатов (табл. 3), нумеруемых в табл. 1.

Предложена процедура диагностирования блока ДУС с глубиной до места отказа при наличии кратных отказов в различных подгруппах. На практике в системах довольно часто встречаются однотипные отказы, вызванные изменениями условий эксплуатации, например, колебание температуры окружающей среды, броски по питанию и т.д. Рассмотрим работоспособность предлагаемого диагностического обеспечения при наличии таких факторов.

### 3. Определение технического состояния блока ДУС с глубиной до места отказа при наличии кратных однотипных и соразмерных отказов в подгруппах блока

В рассматриваемом блоке ДУС в его подгруппах расположены однотипные датчики, в которых по какой либо причине могут возникать однотипные отказы, такие как дрейфы и изменения коэффициентов с одинаковыми отклонениями. Поэтому необходимо рассмотреть работоспособность предлагаемого диагностического обеспечения на кратных и соизмеримых вариантах отказов. С этой целью сформированы следующие предикатные уравнения на основании (14) – (16):

$$z_{1X} = S_1 \left\{ \left| \Delta_1 = \tilde{U}_{X1}(t) - \tilde{U}_{X2}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа в ДУС}_{X1} \text{ и ДУС}_{X2} \text{ или} \\ \text{ДУС}_{X1} \text{ и ДУС}_{X2} \text{ отказы с одной величиной;} \\ 1 - \text{отказ ДУС}_{X1} \text{ или ДУС}_{X2} \\ \text{или различный отказ ДУС}_{X1} \text{ и ДУС}_{X2}; \end{cases} \quad (21)$$

$$z_{2X} = S_2 \left\{ \left| \Delta_2 = \tilde{U}_{X2}(t) - \tilde{U}_{X3}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа ДУС}_{X2} \text{ и ДУС}_{X3} \text{ или} \\ \text{ДУС}_{X2} \text{ и ДУС}_{X3} \text{ отказы одной величины;} \\ 1 - \text{отказ ДУС}_{X2} \text{ или ДУС}_{X3} \\ \text{или различимый отказ ДУС}_{X2} \text{ и ДУС}_{X3}; \end{cases} \quad (22)$$

$$z_{3X} = S_3 \left\{ \left| \Delta_3 = \tilde{U}_{X3}(t) - \tilde{U}_{X1}(t) \right| > \delta_0 \right\} = \begin{cases} 0 - \text{нет отказа ДУС}_{X3} \text{ и ДУС}_{X1} \text{ или} \\ \text{ДУС}_{X3} \text{ и ДУС}_{X1} \text{ отказы одной величины;} \\ 1 - \text{отказ ДУС}_{X3} \text{ или ДУС}_{X1} \\ \text{или различимый отказ ДУС}_{X3} \text{ и ДУС}_{X1}. \end{cases} \quad (23)$$

Анализ предикатных уравнений (21) – (23) показывает, что при наличии предполагаемого потока отказов разработанное диагностическое обеспечение не обеспечивает различимость мест их возникновения. Для устранения этого недостатка, воспользуемся предикатным уравнением  $z_{5_m}$ , сформированным на основании использования информационной избыточности, и, значение которого принимает “0” при работоспособности всех датчиков в подгруппе (табл. 1) и ДУС<sub>0</sub>, а значение “1” – при наличии отказа у произвольного датчика подгруппы или ДУС<sub>0</sub>. Такая связь позволяет сформировать диагностическое обеспечение с глубиной до места отказа при появлении предполагаемого потока отказов и представленного на рис.5. При этом работоспособные датчики определяются путем анализа соответствующих номеров датчиков каждого шага  $m$ , а остальные – неисправные датчики.

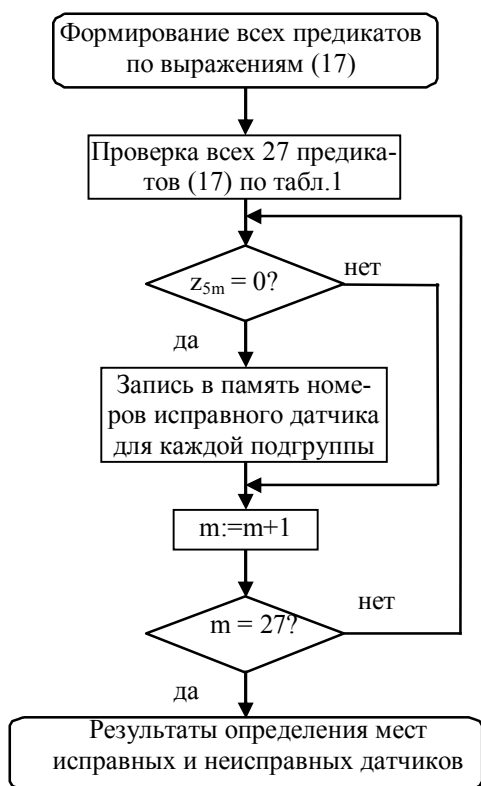


Рис. 5. Диагностическое обеспечение поиска мест отказов в блоке ДУС

## Заключение

Представленное диагностическое обеспечение избыточного блока ДУС системы стабилизации многоцелевого самолета с глубиной до места отказов позволяет при наличии однократных и кратных отказах решать задачи диагностического обеспечения. Кроме того показаны направления модификации разработанного обеспечения с целью расширения его диагностических возможностей.

## Литературы

1. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 1. Проектирование систем управления ракет-носителей [Текст]: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Ю.Е. Балабей, Т.А. Барышникова 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 "Харьковский авиационный институт", НПП Хартрон-Аркас, 2012. – 578 с.
2. Диагностирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с глубиной до места отказа [Текст] / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 1 (28). – С. 75 – 81.
3. 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. – 2008. – № 5 (52). – С. 28 – 33.
4. Фирсов, С.Н. Построение отказоустойчивого измерительного блока акселерометров бесплатформенной навигационной системы беспилотного летательного аппарата [Текст] / С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 1 (48). – С. 5-10.
5. Кулик, А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ., 2000. – 260 с.

*Поступила в редакцию 16.07.2013, рассмотрена на редколлегии 11.09.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БЛОКУ ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ЛІТАКА З ГЛИБИНОЮ ДО МІСЦЯ ВІДМОВИ**

*До Куок Туан, С.М. Фірсов, О.О. Пищухіна*

Розроблено діагностичне забезпечення блоку датчиків кутової швидкості системи управління багатоцільового літака, яке дозволяє визначити технічний стан блоку з глибиною до місця відмови. Доведено можливість ідентифікації місць відмов при різних умовах виникнення відмов, що відрізняються класом, місцем і кратністю. Показано перевагу перспективного розміщення датчиків в блоці у порівнянні з базовим, а також показано особливості діагностування такого розміщення, яка полягає у застосуванні сигнально-параметричного підходу для діагностування технічного стану блоку з глибиною до місця відмови при виникненні кратних відмов у підгрупі. У подальшому отриману інформацію про технічний стан може бути використано для вирішення наступних завдань діагностичного забезпечення - визначення класу та виду відмови.

**Ключові слова:** відмовостійкість, діагностування, навігація, акселерометр, датчик кутової швидкості, сигнальне діагностування, параметричне діагностування, діагностична модель.

### **DETERMINATION OF ANGULAR VELOCITY SENSOR TECHNICAL STATE OF MULTI-PURPOSE AIRCRAFT CONTROL SYSTEM WITH THE DEPTH OF FAULT'S PLACE**

*Do Quok Tuan, S.N. Firsov, O.A. Pishchukhina*

Diagnostic software for angular velocity sensors of multi-purpose aircraft control system is developed. It allows to determine the technical condition of the sensor block with the depth of the point of failure. Ability to identify fault's locations under different conditions of fault's class, place and multiplicity is proved. The advantage of the given location of sensors in the block in comparance with the baseline has shown. Diagnostic feature of such placement with using of signal-parametric approach for the diagnosis of the technical condition to the point of failure while appearance of multiple failures in the subgroup is presented. Subsequently, the information about the technical condition can be used to solve the following problems diagnostic software - definition of the class and type of failure

**Keywords:** fault tolerance, diagnostics, navigation, accelerometer, angular velocity sensor, signal diagnosis, parametric diagnosis, diagnostic model.

**До Куок Туан** – канд. техн. наук, преподаватель кафедры авионики, Ханойская авиатехническая академия, Ханой, Вьетнам, e-mail: tuan\_kiev@yahoo.com, dotuan249@gmail.com.

**Фірсов Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Firsov@d3.khai.edu.

**Пищухина Ольга Александровна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры социальной информатики, Национальный университет радиозлектроники, Харьков, Украина, e-mail: pishchukhina@gmail.com.