

УДК 681.5

А.С. КУЛИК, С.Н. ФИРСОВ, КУОК ТУАН ДО, О.Ю. ЗЛАТКИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ  
В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

*Решена задача определения класса отказа не работоспособной БИНС ЛА путем применения диагностических моделей (ДМ), представляющих собой особый класс математических моделей, связывающих косвенные и прямые признаки отказа. Применяя полученные ДМ, сформированы алгоритмы оперативного диагностирования технического состояния БИНС в виде дихотомических деревьев определения класса-вида отказа, отличающиеся от известных алгоритмов использованием в узлах дихотомических деревьев бинарных признаков, представляющих собой результаты решения двузначных предикатных уравнений, где условиями предикатных конструкций являются характеристики ДМ. Также представлены математические модели и инструментальные средства оперативного восстановления работоспособности БИНС с использованием аппаратной и сигнальной видов избыточностей.*

**Ключевые слова:** *отказоустойчивость, диагностирование, навигация, акселерометр, датчик угловой скорости, отказ, восстановление работоспособности, сигнальная и параметрическая подстройки.*

**Введение**

Опыт практического использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) свидетельствует о низком уровне их живучести [1]. Такое состояние по живучести БПЛА определяется недостаточным уровнем обеспечения отказоустойчивости систем БПЛА, к которым относятся инерциальные навигационные системы [2, 3]. Существующие подходы к обеспечению отказоустойчивости бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) БПЛА в основном базируются на формировании аппаратной избыточности [4 – 6], представляющей собой классическую мажоритарную схему. Использование традиционных методов резервирования позволяет заложить свойство отказоустойчивости БИНС при ее проектировании, что позволяет сохранить полную или частичную работоспособность системы в состоянии отказа за счет аппаратной или информационной избыточности. Применение методов традиционного резервирования ограничено из-за свойственных ему недостатков: наиболее эффективным является резервирование простых, высоконадежных устройств, которым БИНС БПЛА не является; при повышении кратности резервирования уменьшается и без того малое среднее время безотказной работы БИНС БПЛА; низкая эффективность резервирования при одновременном воздействии неблагоприятных факторов, что приводит к появлению зависимых отказов, сбоев, а в последствии к лавинообразному нарастанию нарушений в работе БИНС БПЛА; возрастание массо-габаритных характеристик БПЛА, определяю-

щих увеличение энергопотребления и рост стоимостных показателей его производства и эксплуатации.

Как показывает анализ методов резервирования, ни один из них не может быть использован при повышении уровня отказоустойчивости БИНС БПЛА, т.к. их применение приводит к ее аппаратной избыточности, увеличению массы конструкции и повышению стоимостных показателей.

Одним из перспективных путей обеспечения безотказной работы БИНС БПЛА является ее интеллектуализация, заключающаяся в наделении БИНС способностью самодиагностироваться, а затем по результатам диагноза восстанавливать свою работоспособность. Интеллектуализация БИНС БПЛА достигается путем применения системного подхода к обеспечению отказоустойчивости БИНС БПЛА, базирующегося на принципе самоорганизации и комплексного применения различных средств для сохранения работоспособности системы при отказах функциональных элементов [7]. Этот подход предполагает декомпозировать процесс обеспечения отказоустойчивости на два этапа и перейти от пассивной формы обеспечения отказоустойчивости к активной [8]. В данном подходе к обеспечению отказоустойчивости БИНС БПЛА предлагается раскрыть целостность системы и обеспечивающих ее механизмов [9], выявить многообразие типов связей в БИНС [10], установить влияние на БИНС различных отказов с глубиной до вида, построить математические модели работоспособного и неработоспособного состояния БИНС [11], затем сформировать иерархию диагностических моделей, связывающих кос-

венные признаки отказов с прямыми признаками. На основании полученной информации об отказе производится восстановление работоспособности БИНС. Такой подход позволяет активно парировать появляющиеся виды отказов, используя при этом все возможные избыточные ресурсы, чего не возможно при использовании других подходов.

В рамках системного подхода для решения задачи диагностирования технического состояния БИНС БПЛА применяют сигнально-параметрический подход, базирующийся на применении функциональных диагностических моделей (ФДМ) и позволяющий диагностировать техническое состояние БИНС с глубиной до вида отказов, разрешая при этом неопределенности, связанные с моментом времени возникновения отказа, его местом, классом и видом. Первые две задачи диагностического обеспечения уже решены [8 – 12], нерешенными являются задача определения класса и вида отказа БИНС БПЛА, а также рационального распределения средств восстановления измерений БИНС.

### 1. Определение класса отказов БИНС БПЛА

После установления места отказа в БИНС БПЛА [12] требуется выяснить возможную причину отказа. Причины отказов для каждого элемента БИНС сформированы в соответствующие классы, каждый из которых характеризуется единственным параметром  $\alpha_i$ . Таким образом, задача определения классов отказов заключается в выборе такой совокупности косвенных диагностических признаков, использование которых позволяет построить правила, однозначно выявляющие класс появившегося отказа из заданного множества. Следовательно, задача определения класса отказа сводится к двум взаимосвязанным задачам: формирование признакового пространства классов отказов; построение правил определения классов отказов (ПОК) в целях установления принадлежности отказа, возникшего в функциональном элементе БИНС, соответствующему классу.

Для датчиков БИНС характерно два класса отказов: изменение коэффициентов передачи и дрейф.

В предлагаемом варианте БИНС справедливы следующие аналитические соотношения:

$$U_{AK_0}(k) = (U_{AK_X}(k) + U_{AK_Y}(k) + U_{AK_Z}(k)) / \sqrt{3}; \quad (1)$$

$$U_{DUC_0}(k) = (U_{DUC_X}(k) + U_{DUC_Y}(k) + U_{DUC_Z}(k)) / \sqrt{3}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{AK_0}(k) &= \tilde{U}_{AK_0}(k) - \\ &- (\tilde{U}_{AK_X}(k) + \tilde{U}_{AK_Y}(k) + \tilde{U}_{AK_Z}(k)) / \sqrt{3}; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{DUC_0}(k) &= \tilde{U}_{DUC_0}(k) - \\ &- (\tilde{U}_{DUC_X}(k) + \tilde{U}_{DUC_Y}(k) + \tilde{U}_{DUC_Z}(k)) / \sqrt{3}; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{AK_X}(k) &= \\ &= \tilde{U}_{AK_X}(k) - \sqrt{3}\tilde{U}_{AK_0}(k) + (\tilde{U}_{AK_Y}(k) + \tilde{U}_{AK_Z}(k)); \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{AK_Y}(k) &= \\ &= \tilde{U}_{AK_Y}(k) - \sqrt{3}\tilde{U}_{AK_0}(k) + (\tilde{U}_{AK_X}(k) + \tilde{U}_{AK_Z}(k)); \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{AK_Z}(k) &= \\ &= \tilde{U}_{AK_Z}(k) - \sqrt{3}\tilde{U}_{AK_0}(k) + (\tilde{U}_{AK_X}(k) + \tilde{U}_{AK_Y}(k)); \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{DUC_X}(k) &= \tilde{U}_{DUC_X}(k) - \\ &- \sqrt{3}\tilde{U}_{DUC_0}(k) + (\tilde{U}_{DUC_Y}(k) + \tilde{U}_{DUC_Z}(k)); \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{DUC_Y}(k) &= \tilde{U}_{DUC_Y}(k) - \\ &- \sqrt{3}\tilde{U}_{DUC_0}(k) + (\tilde{U}_{DUC_X}(k) + \tilde{U}_{DUC_Z}(k)); \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{DUC_Z}(k) &= \tilde{U}_{DUC_Z}(k) - \\ &- \sqrt{3}\tilde{U}_{DUC_0}(k) + (\tilde{U}_{DUC_X}(k) + \tilde{U}_{DUC_Y}(k)); \quad (10) \end{aligned}$$

где  $\Delta U_{AK_0}(k)$ ,  $\Delta U_{DUC_0}(k)$  – отклонения суммарных напряжений на  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ,  $DUC_x$ ,  $DUC_y$ ,  $DUC_z$  от напряжения на  $A_0$  и  $DUC_0$ , соответственно;  $\tilde{U}_{AK_X}(k)$ ,  $\tilde{U}_{AK_Y}(k)$ ,  $\tilde{U}_{AK_Z}(k)$ ,  $\tilde{U}_{AK_0}(k)$ ,  $\tilde{U}_{DUC_X}(k)$ ,  $\tilde{U}_{DUC_Y}(k)$ ,  $\tilde{U}_{DUC_Z}(k)$ ,  $\tilde{U}_{DUC_0}(k)$  – напряжения на выходах датчиков  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ,  $A_0$ ,  $DUC_x$ ,  $DUC_y$ ,  $DUC_z$ ,  $DUC_0$  в  $k$ -й момент времени, соответственно;  $\Delta U_{AK_X}(k)$ ,  $\Delta U_{AK_Y}(k)$ ,  $\Delta U_{AK_Z}(k)$ ,  $\Delta U_{DUC_X}(k)$ ,  $\Delta U_{DUC_Y}(k)$ ,  $\Delta U_{DUC_Z}(k)$  – отклонения напряжений на  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ,  $DUC_x$ ,  $DUC_y$ ,  $DUC_z$  от номинальных.

Полученные равенства (1) – (10) представляют собой диагностические МД-модели для задачи определения места отказа в БИНС ЛА и используемые при решении задачи определения класса и вида отказа.

С учетом выполненной параметризации отказов предикатные уравнения для определения класса отказов  $i$ -го датчика будут иметь вид:

$$\begin{aligned} z_1 &= \left\{ \left| \tilde{U}_{AK_X} \right| > \delta_2 \right\} = \\ &= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } A_x, \\ 0 - \text{дрейф или изменение коэффициента } A_x; \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_2 &= \left\{ \left| \tilde{U}_{AK_Y} \right| > \delta_2 \right\} = \\ &= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } A_y, \\ 0 - \text{дрейф или изменение коэффициента } A_y; \end{cases} \quad (12) \end{aligned}$$

$$z_3 = \left\{ \left| \tilde{U}_{AK_Z} \right| > \delta_2 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } A_z, \\ 0 - \text{дрейф или изменение коэффициента } A_z; \end{cases} \quad (13)$$

$$z_4 = \left\{ \left| \tilde{U}_{AK_0} \right| > \delta_2 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } A_0, \\ 0 - \text{дрейф или изменение коэффициента } A_0; \end{cases} \quad (14)$$

$$z_5 = \left\{ \left| \tilde{U}_{ДУС_x}(k) \right| > \delta_3 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } ДУС_x, \\ 0 - \text{дрейф или изм. коэффициента } ДУС_x; \end{cases} \quad (15)$$

$$z_6 = \left\{ \left| \tilde{U}_{ДУС_y}(k) \right| > \delta_3 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } ДУС_y, \\ 0 - \text{дрейф или изм. коэффициента } ДУС_y; \end{cases} \quad (16)$$

$$z_7 = \left\{ \left| \tilde{U}_{ДУС_z}(k) \right| > \delta_3 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } ДУС_z, \\ 0 - \text{дрейф или изм. коэффициента } ДУС_z; \end{cases} \quad (17)$$

$$z_8 = \left\{ \left| \tilde{U}_{ДУС_0}(k) \right| > \delta_3 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{обрыв } ДУС_0, \\ 0 - \text{дрейф или изм. коэффициента } ДУС_0; \end{cases} \quad (18)$$

$$z_9 = \left\{ \Delta U_{AK_x}(k+1) - \Delta U_{AK_x}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } A_x, \\ 0 - \text{изменение коэффициента } A_x; \end{cases} \quad (19)$$

$$z_{10} = \left\{ \Delta U_{AK_y}(k+1) - \Delta U_{AK_y}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } A_y, \\ 0 - \text{изменение коэффициента } A_y; \end{cases} \quad (20)$$

$$z_{11} = \left\{ \Delta U_{AK_z}(k+1) - \Delta U_{AK_z}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } A_z, \\ 0 - \text{изменение коэффициента } A_z; \end{cases} \quad (21)$$

$$z_{12} = \left\{ \Delta U_{AK_0}(k+1) - \Delta U_{AK_0}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } A_0, \\ 0 - \text{изменение коэффициента } A_0; \end{cases} \quad (22)$$

$$z_{13} = \left\{ \Delta U_{ДУС_x}(k+1) - \Delta U_{ДУС_x}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } ДУС_x, \\ 0 - \text{изм. коэффициента } ДУС_x; \end{cases} \quad (23)$$

$$z_{14} = \left\{ \Delta U_{ДУС_y}(k+1) - \Delta U_{ДУС_y}(k) \approx 0 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{дрейф } ДУС_y, \\ 0 - \text{изм. коэффициента } ДУС_y; \end{cases} \quad (24)$$

$$z_{15} = \left\{ \Delta U_{ДУС_z}(k+1) - \Delta U_{ДУС_z}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } ДУС_z, \\ 0 - \text{изм. коэффициента } ДУС_z; \end{cases} \quad (25)$$

$$z_{16} = \left\{ \Delta U_{ДУС_0}(k+1) - \Delta U_{ДУС_0}(k) \approx 0 \right\} = \begin{cases} 1 - \text{дрейф } ДУС_0, \\ 0 - \text{изм. коэффициента } ДУС_0, \end{cases} \quad (26)$$

где  $\delta_2, \delta_3$  – допустимые значения сигналов;  $z_i$  – двухзначные предикаты, описывающие процесс сравнения значений напряжений ( $i = \overline{1,16}$ );  $s_2$  – символ двухзначного предикатного уравнения.

На основании полученных предикатных уравнений формируем алгоритм определения класса отказа в БИНС ЛА, фрагмент которого представлен на рис. 1 в виде дихотомического дерева для акселерометра  $A_x$ .

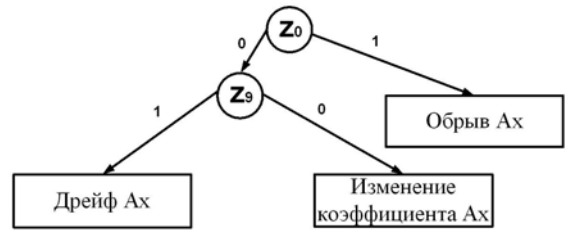


Рис. 1. Фрагмент дихотомического дерева определения класса отказов

Аналогично формируются фрагменты дихотомических деревьев для остальных элементов БИНС.

Следующим этапом определения характеристик отказов является решение обратной задачи диагностического обеспечения БИНС, заключающейся в формировании алгоритмов для вычисления значения прямых признаков отказов  $\Delta \hat{\alpha}_i$ . На основании условия квазистационарности  $\Delta \alpha_i$  значения  $\Delta \hat{\alpha}_i$  определяются из соответствующих, полностью диагностируемых ДФМ классов отказов. Так, например, для классов отказов «дрейф акселерометра  $A_x$ » и «изменение коэффициента передачи акселерометра  $A_x$ » зависимости для решения обратных задач примут следующий вид:

$$\Delta U_{AK_x} = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta U_{AK_x}(k)}{N}; \quad (27)$$

$$\Delta k_{AK_x} = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta U_{AK_x}(k)}{N} = \frac{\sum_{k=1}^N \tilde{U}_{AK_x}(k) - (\sqrt{3}\tilde{U}_{AK_0}(k) - (\tilde{U}_{AK_y}(k) + \tilde{U}_{AK_z}(k)))}{\sqrt{3}\tilde{U}_{AK_0}(k) - (\tilde{U}_{AK_y}(k) + \tilde{U}_{AK_z}(k))} \quad (28)$$

Определение характеристик параметров отказов БИНС, полученных при диагностировании с глубиной до вида отказа, представляет собой основу для следующего этапа обеспечения активной отказоустойчивости – восстановления работоспособности БИНС.

## 2. Восстановление работоспособности БИНС БЛА

Восстановление работоспособности – процесс перевода объекта из неработоспособного состояния в работоспособное [7]. Восстановление работоспособности БИНС путем ее замены в реальных условиях полета ЛА невозможно, поэтому актуальной задачей является восстановление работоспособности ее отказавших элементов в режиме реального времени. Виды отказов, при которых удастся восстановить нормальное функционирование БИНС, будем называть парируемыми.

Восстановление работоспособности происходит за счет использования дополнительных, заложенных при проектировании, гибко управляемых средств, которые представляют собой аппаратную, информационную и функциональную избыточности. Анализ предлагаемого варианта БИНС [13] показал, что возможно использование трех средств восстановления его работоспособности: *сигнальная подстройка, параметрическая подстройка и реконфигурация аппаратуры*. Таким образом, множество средств восстановления работоспособности БИНС представим в следующем виде:

$$E = \{e_1, e_2, e_3\}, \quad (29)$$

где  $e_1$  – сигнальная подстройка;  $e_2$  – параметрическая подстройка;  $e_3$  – реконфигурация аппаратуры.

Применение подстроек (сигнальной и параметрической) для восстановления работоспособности БИНС позволяет парировать ограниченное множество видов отказов. Для организации сигнальной подстройки в микропроцессорной системе предусмотрены специальные алгоритмы, которые на основании диагностической информации корректируют сигналы с выходов датчиков.

Особенность восстановления работоспособности БИНС реконфигурацией аппаратуры состоит в использовании лишь исправного функционального элемента, в то время как отказавший элемент исключается из контура управления. В этом случае происходит отключение не только выхода отказав-

шего функционального элемента, но и его питания по соответствующей команде от управляющего элемента на соответствующие коммутаторы. Это обеспечивает изоляцию отказавшего функционального элемента от процесса управления. Для компенсации недостающего сигнала необходимо сформировать соответствующий сигнал на основании сигналов работоспособных датчиков. Такая реконфигурация аппаратуры обеспечивает абсолютную устойчивость БИНС ко всем возможным видам отказов.

## 3. Стенд исследования БИНС ЛА с активной отказоустойчивостью

Для отладки диагностического обеспечения БИНС разработан специализированный аппаратно-программный комплекс, позволяющий вводить отказы в БИНС, диагностировать их с глубиной до вида отказа, отображать техническое состояние и результаты диагностирования БИНС, а также гибко восстанавливать работоспособность БИНС в режиме реального времени. В аппаратную часть комплекса входят платформа имитации вращения ЛА, блок датчиков отказоустойчивой БИНС, микропроцессорная система, в которой реализуются алгоритмы диагностирования БИНС и алгоритмы получения навигационной информации, ПЭВМ, позволяющая отображать текущую информацию и имитировать аварийное функционирование БИНС. На рис. 2 представлена экранная форма имитатора отказов. Имитатор отказов позволяет в режиме реального времени вводить отказы в БИНС, отображать ее текущее состояние, результаты диагностирования технического состояния БИНС и результаты ее восстановления, что позволяет проверять работоспособность разработанного алгоритмического обеспечения.

Разработанный программный имитатор отказов, который конструктивно входит в программную часть комплекса, позволяет без физического вмешательства в структуру имитировать возникновение отказов в малогабаритной БИНС как по желанию оператора, так и путем включения генератора случайных чисел, что существенно упрощает отладку работы и проверку адекватности разработанных алгоритмов обеспечения отказоустойчивости БИНС.

Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного алгоритмического обеспечения и достоверность выдвинутых гипотез.

## Заключение

Полученные ДМ необходимы для проектирования алгоритмов оперативного диагностирования технического состояния БИНС в виде дихотомических деревьев определения класса-вида. Они отличаются от известных алгоритмов диагностирования

глубиной до физического вида отказа, а также использованием в узлах дихотомических деревьев бинарных признаков, представляющих собой результаты решения двузначных предикатных уравнений, где условиями предикатных конструкций являются характеристики диагностических моделей.

На основании разработанных ДМ и сформированных алгоритмов диагностирования БИНС с заданной глубиной разработаны математические мо-

дели и инструментальные средства оперативного восстановления работоспособности БИНС с использованием аппаратной и сигнальной избыточностей. Разработанные алгоритмы восстановления работоспособности представляют собой эффективное средство, позволяющее восстановить измерения БИНС ЛА с заданной степенью точности при возникновении в ней парируемых отказов полученными средствами восстановления.

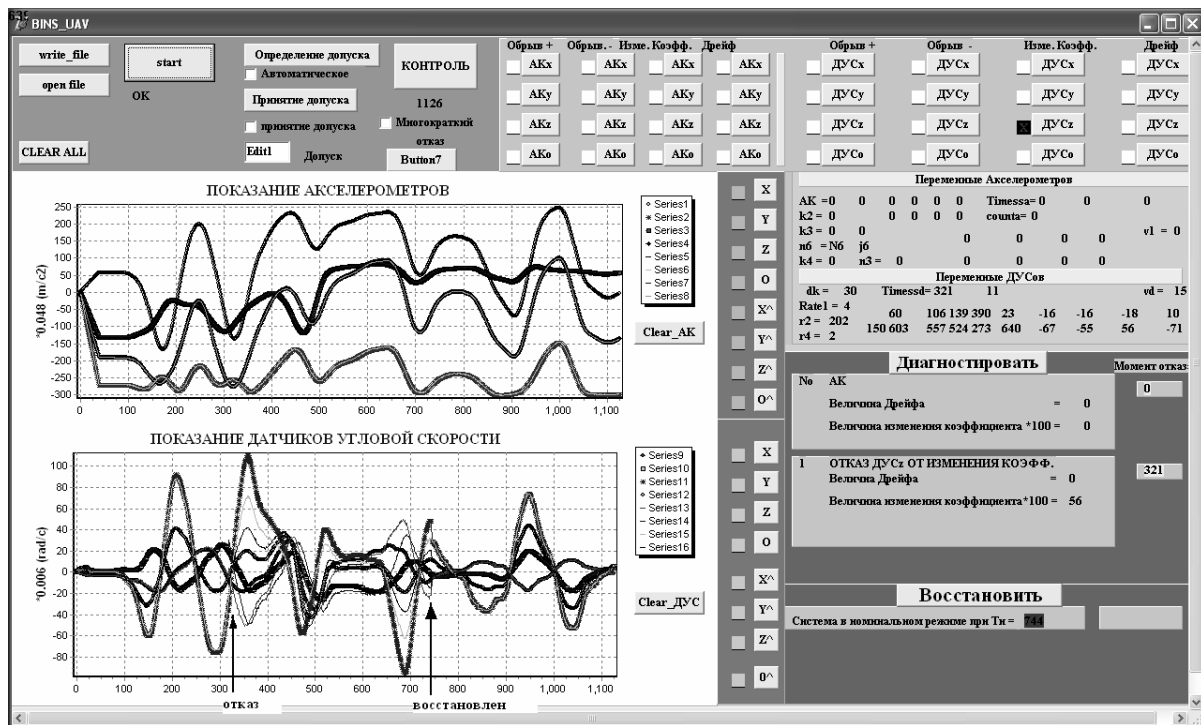


Рис. 2. Экспериментальное исследование алгоритмов диагностирования и восстановления БИНС

Для подтверждения теоретических исследований работы и практической реализуемости полученных алгоритмов разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий обеспечить активную отказоустойчивость БИНС путем программного введения отказов в БИНС, их диагностирования с заданной глубиной и гибкого восстановления ее работоспособности с использованием структурной и сигнальной видов избыточностей.

Как показали экспериментальные исследования, разработанное обеспечение активной отказоустойчивости позволяет не только получить достоверную и оперативную оценку технического состояния БИНС, а также оперативно восстанавливать работоспособность БИНС летательных аппаратов в режиме реального времени.

## Литература

1. Макаров И.М. Интеллектуальные системы управления (направления исследований и результаты

разработок МИРЭА) / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 8. – С. 9-14.

2. Гришин Ю.П. Динамические системы, устойчивые к отказам / Ю.П. Гришин, Ю.М. Казаринов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.

3. Златкин Ю.М. Стан розробки та тенденції розвитку авіаційних безкарданних інерціальних навігаційних систем / Ю.М. Златкин, В.Г. Ігнат'єв, А.М. Калногуз, А.Ф. Кириченко, В.Д. Черкашин // Механіка гіроскопічних систем. – 1997. – № 14. – С. 112-119.

4. Методы и средства измерения параметров движения самолетов: Учебн. для вузов / Н.И. Брехин, Н.Д. Кошевой. – Х.: Факт, 2004. – 344 с.

5. Гордин А.Г. Математические модели и измерительные средства бескарданых инерциальных навигационных систем: Учебн. пособие / А.Г. Гордин. – Х.: ХАИ, 1997. – 113 с.

6. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы / А.С. Кулик // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-тет, 2000. – Вып. 15. – С. 18-31.

7. Фирсов С.Н. Построение отказоустойчивого измерительного блока акселерометров бесплатформенной навигационной системы беспилотного летательного аппарата / С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 1 (48). – С. 5-10.

8. Кулик А.С. Диагностирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с глубиной до места отказа / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2008. – № 1 (28). – С. 75-81.

9. Кулик А.С. Повышение точности инерциальной навигационной системы летательного аппарата / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2008. – № 2 (29). – С. 50-54.

10. Кулик А.С. Обеспечение активной отказоустойчивостью малогабаритной БИНС БПЛА / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // *Праці десятої ювілейної міжнародної науково-практичної конференції «Людина і космос»*. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 458.

11. Кулик А.С. Отказоустойчивая навигационная система / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // *Матеріали четвертої міжнародної НПК «Розвиток наукових досліджень 2008»*. – Полтава: ІнтерГрафіка, 2008. – Т. 4. – С. 237.

12. Кулик А.С. Стендовое компьютерное диагностирование отказоустойчивой малогабаритной БИНС БПЛА / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, До Куок Туан, О.Ю. Златкин // *Збірник доповідей науково-практичної конференції з міжнародною участю СІПР-2008*. – К., 2008. – С. 257-258.

Поступила в редакцию 23.09.2008

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

## ВІДНОВЛЕННЯ ВИМІРІВ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

*А.С. Кулік, С.М. Фірсов, Куок Туан До, О.Ю. Златкін*

Вирішено задачу визначення класу відмови непрацездатної БИНС ЛА шляхом застосування діагностичних моделей (ДМ), що є особливим класом математичних моделей, які пов'язують непрямі та прямі ознаки відмови. Із використанням одержаних ДМ сформовано алгоритми оперативного діагностування технічного стану БИНС у вигляді дихотомічних дерев визначення класу-виду відмови, які відрізняються від відомих алгоритмів застосуванням у вузлах дихотомічних дерев бінарних ознак, що є результатами вирішення двозначних предикатних рівнянь, де умовами предикатних конструкцій є характеристики ДМ. Також наведені математичні моделі та інструментальні засоби оперативного відновлення працездатності БИНС з використанням апаратної та сигнальної видів надмірностей.

**Ключові слова:** відмовостійкість, діагностування, навігація, акселерометр, датчик кутової швидкості, відмова, відновлення працездатності, сигнальне та параметричне підстроювання.

## RENEWAL OF NAVIGATION SYSTEMS MEASURING IN THE REAL TIME MODE

*A.S. Kulik, S.N. Firsov, Kuok Tuan Do, O.Yu. Zlatkin*

The task of fault class definition for inoperative strapdown inertial navigation system(SINS) of flying vehicle by application of diagnostic models (DM), being the special class of mathematical models that link the indirect and direct parameters of fault, is solved. Applying received DM the algorithms of the operative diagnosing of SINS technical state in the form of dichotomies trees for fault class definition is generated. It is different from the known algorithms by the use in the knots of dichotomies trees of binary signs being the results of decision of two-digit predicates equalizations, where characteristics of DM are the conditions of predicates constructions. Mathematical models and instrumental tools of operative SINS restoration that use hardware and signal redundancy are also represented.

**Key words:** fault tolerance, diagnosing, navigation, accelerometer, angular velocity, fault, restoration, signal and parametric trimming.

**Кулик Анатолий Степанович** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kulik@d3.khai.edu.

**Фирсов Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: firsov@d3.khai.edu.

**До Куок Туан** – аспирант кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Златкин Олег Юрьевич** – аспирант кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.