

УДК 681.5

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

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ДИАГНОСТИРОВАНИЕ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ГЛУБИНОЙ ДО МЕСТА ОТКАЗА**

Предлагается компоновка датчиков угловой скорости и акселерометров в БИНС БПЛА, позволяющая обеспечивать ее полное диагностирование с глубиной до места отказа. Представлены диагностические модели БИНС БПЛА и ее функциональных элементов, приведены разработанные алгоритмы диагностического обеспечения БИНС БПЛА и результаты их экспериментального исследования. Экспериментальные исследования показали, что применение сигнально-параметрического подхода позволило диагностировать техническое состояние БИНС БПЛА с глубиной до места отказа, а в последующем полученная информация о техническом состоянии может быть использована для решения последующих задач диагностического обеспечения – определение класса и вида отказа.

отказоустойчивость, диагностирование, навигация, акселерометр, датчик угловой скорости, сигнальная диагностируемость, параметрическая диагностируемость, диагностическая модель, отказ

Введение

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) вырабатывают параметры, характеризующие местоположение, скорость и угловую ориентацию объекта управления. В качестве исходной информации для управления этими параметрами используются данные о линейном и угловом движениях объекта относительно инерциального пространства, измеряемые чувствительными элементами (ЧЭ), входящими в состав БИНС. Отличие БИНС от платформенной инерциальной навигационной системы (ИНС) заключается в том, что в ИНС параметры движения БПЛА вырабатываются ЧЭ, установленными на гиросtabilизированной платформе, а в БИНС ЧЭ закреплены непосредственно на корпусе беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и параметры движения БПЛА вычисляются в навигационном вычислителе по определенным алгоритмам [1 – 2].

Это обстоятельство определяет ограниченность автономного применения БИНС из-за растущих во времени погрешностей определения координат, обусловленных, в частности, дрейфами ЧЭ, а также другими видами отказов, возникающими в процессе эксплуатации. Таким образом, обеспечение отказоустойчивости

элементов БИНС БПЛА является одной из актуальных задач при разработке БПЛА [3 – 4].

Можно выделить три подхода к обеспечению отказоустойчивости: совершенствование элементной базы БИНС; резервирование ЧЭ БИНС; системный подход. Первый подход, связанный с совершенствованием элементной базы, заключается в разработке высоконадежных ЧЭ, что приводит к удорожанию разработки, увеличению времени на ее создание, а также к неосуществимости проекта из-за высоких требований к ЧЭ. Второй подход, связанный с резервированием ЧЭ, наиболее распространен и решает поставленные задачи, но при этом увеличение элементов приводит к увеличению энергопотребления и массы БИНС, а также к решению дополнительных задач, связанных с вопросами начальной выставки. Системный подход, заключающийся в глубоком диагностировании технического состояния БИНС и гибком ее восстановлении в режиме реального времени, позволяет при минимальном количестве ЧЭ с определенными показателями надежности, обеспечить отказоустойчивость ЧЭ БИНС БПЛА. Для диагностирования технического состояния ЧЭ БИНС применяют сигнально-параметри-

ческий 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 и классом. ФДМ представляют собой особый класс математических моделей, связывающих косвенные и прямые признаки отказов, и позволяющие решать обратную задачу диагностирования – определение величины изменения класса отказа (например, величины дрейфа и т.д.). Для каждой задачи диагностирования формируются соответствующие ФДМ, на основании анализа номинального и аварийного функционирования ЧЭ БИНС БПЛА. Таким образом, для применения системного подхода к обеспечению активной отказоустойчивости ЧЭ БИНС БПЛА, необходимо первоначально сформировать компоновку БИНС, позволяющую решать навигационную задачу и первостепенные задачи диагностического обеспечения – определение момента времени и места возникновения отказа [5-6].

1. Компоновка ЧЭ БИНС БПЛА

Огромное количество существующих вариантов построения БИНС можно классифицировать по признаку наличия ЧЭ, определяющих параметры углового движения БПЛА: БИНС на акселерометрах и БИНС с гироскопическими измерителями угловых параметров БПЛА. Первая группа БИНС характеризуется простотой технической реализации, однако для нее присущи недостатки, связанные с определением направления вращения и очень актуальна проблема начальной выставки. Типичным представителем второй группы является БИНС, состоящая из трех акселерометров и трех датчиков угловой скорости (ДУС). Оси чувствительности акселерометров и ДУС ортогональны друг другу и совпадают (или параллельны) с осями связанной с БПЛА системой координат. Такое построение БИНС является наиболее простым с точки зрения об-

работки информации, но недостаток такой системы БИНС заключается в том, что глубина диагностирования БИНС ограничивается только определением момента времени возникновения отказа, поэтому является актуальным проектирование таких БИНС, в которых количество ЧЭ и их компоновка позволят решать основные задачи, возложенные на БИНС, а также диагностировать техническое состояние с глубиной до места отказа – определение отказавшего ЧЭ БИНС.

Для выполнения условия полной диагностируемости БИНС необходимо обеспечение структурной и сигнальной диагностируемости устройства при решении каждой задачи диагностируемости. Обеспечение выполнения критерия сигнальной диагностируемости достигается путем формирования соответствующих входных сигналов, обеспечивающих выполнение соответствующего критерия. Выполнение критерия сигнальной диагностируемости является достаточным условием диагностируемости. Для обеспечения необходимого условия диагностируемости необходимо выполнение критерия структурной диагностируемости БИНС – если система структурно не диагностируема при решении соответствующей задачи диагностического обеспечения, то она также сигнально не диагностируема, а соответственно не выполняются условия полной диагностируемости. Таким образом, задача обеспечения структурной диагностируемости БИНС, является первостепенной и необходимой при разработке диагностического обеспечения.

Так как БИНС принадлежит к объектам диагностирования с неизвестным входом, то единственный путь обеспечения выполнения критерия структурной диагностируемости, является введение структурной избыточности. Одним из примеров введения структурной избыточности, является мажоритарная схема включения ЧЭ в БИНС – по три акселерометра и три датчика угловых скоростей по каждой оси связанной с БПЛА системой координат. Но, несмотря на то, что указанная схема обеспечивает полную диагностируе-

мость БИНС с глубиной до места отказа, введение чрезмерного количества ЧЭ приводит к увеличению массы, габаритов и энергопотребления БИНС. Подобное ограничение определяет актуальность задачи проектирования БИНС БПЛА с минимальной структурной избыточностью, позволяющей обеспечивать структурную диагностируемость БИНС с глубиной до вида отказа. Вариант БИНС с минимальной структурной избыточностью представлен на рис. 1.

Предлагаемый вариант БИНС со структурной избыточностью состоит из 4-х акселерометров (A_x, A_y, A_z, A_0) и четырех датчиков угловой скорости $ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z$ и $ДУС_0$ (рис. 1). Для простоты объяснения преимущества предлагаемой конфигурации БИНС предположим, что центр измерительного трехгранника совпадает с центром масс ЛА. Оси чувствительности A_x, A_y, A_z и $ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z$ совпадают с осями связанной с БПЛА системой координат Ox, Oy, Oz соответственно. Все шесть датчиков располагаются на расстоянии R от начала системы координат. Ось чувствительности акселерометра A_0 и датчика угловой скорости $ДУС_0$ совпадают с диагональю куба образованного осями чувствительности A_x, A_y, A_z и $ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z$, соответственно. Датчики A_0 и $ДУС_0$ расположены на расстоянии $\sqrt{3}R$ от начала координат

2. Математические модели номинального и возмущенного функционирования БИНС БПЛА

Учитывая расположение ЧЭ (рис. 1) и влияние на показание акселерометров проекций угловой скорости на оси связанной системы координат, значения выходных сигналов $A_x, A_y, A_z, ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z$ будут определяться следующими выражениями:

$$a'_x(k) = a_x(k) - ((\omega_y(k))^2 + (\omega_z(k))^2)R_{AK_X}; \quad (1)$$

$$a'_y(k) = a_y(k) - ((\omega_x(k))^2 + (\omega_z(k))^2)R_{AK_Y}; \quad (2)$$

$$a'_z(k) = a_z(k) - ((\omega_y(k))^2 + (\omega_x(k))^2)R_{AK_Z}, \quad (3)$$

$$\omega'_x(k) = \omega_x(k); \quad \omega'_y(k) = \omega_y(k); \quad \omega'_z(k) = \omega_z(k); \quad (4)$$

где $R_{AK_X} = R_{AK_Y} = R_{AK_Z} = R$ – расстояние от начала координат до акселерометров A_x, A_y, A_z соответственно; $a'_x(k), a'_y(k), a'_z(k)$ – значения выходных сигналов акселерометров A_x, A_y, A_z соответственно; $a_x(k), a_y(k), a_z(k)$ – проекции кажущихся ускорений на оси чувствительности акселерометров A_x, A_y, A_z ; $\omega_x(k), \omega_y(k), \omega_z(k)$ – проекции угловой скорости вращения на оси связанной системы координат; $\omega'_x(k), \omega'_y(k), \omega'_z(k)$ – значения выходных сигналов $ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z$, соответственно; k – дискретные моменты времени измерения. Для простоты записи выражений шаг квантования будем опускать.

Так как оси чувствительности A_0 и $ДУС_0$ совпадают с диагональю куба (рис. 1), то их показания будут определяться следующими аналитическими зависимостями:

$$a'_0(k) = \frac{1}{\sqrt{3}}(a_x(k) + a_y(k) + a_z(k)) - \frac{((\omega_x(k))^2 + (\omega_y(k))^2 + (\omega_z(k))^2)R_{A_0}}{3}; \quad (5)$$

$$\omega'_0(k) = (\omega_x(k) + \omega_y(k) + \omega_z(k)) / \sqrt{3}, \quad (6)$$

где $a'_0(k)$ – значение выходного сигнала акселерометра A_0 ; R_{A_0} – расстояние от начала координат до точки установки A_0 ; $\omega'_0(k)$ – значение выходного сигнала $ДУС_0$.

На основании выражений (1)–(3) и при условии выполнения тождества $R_{A_0} = \sqrt{3}R_{AK_X} = \sqrt{3}R_{AK_Y} = \sqrt{3}R_{AK_Z} = \sqrt{3}R$ выражения (5) примут вид

$$a'_0(k) = (a'_x(k) + a'_y(k) + a'_z(k)) / \sqrt{3}. \quad (7)$$

На выходе датчиков БИНС БПЛА формируется сигнал в виде напряжения постоянного тока. На основании этого введем следующие обозначения: $U_{AK_X}(k), U_{AK_Y}(k), U_{AK_Z}(k), U_{AK_0}(k), U_{ДУС_x}(k), U_{ДУС_y}(k), U_{ДУС_z}(k), U_{ДУС_0}(k)$ – значения напряжений на выходах датчиков $A_x, A_y, A_z, A_0, ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z$ и $ДУС_0$, соответственно в k -й

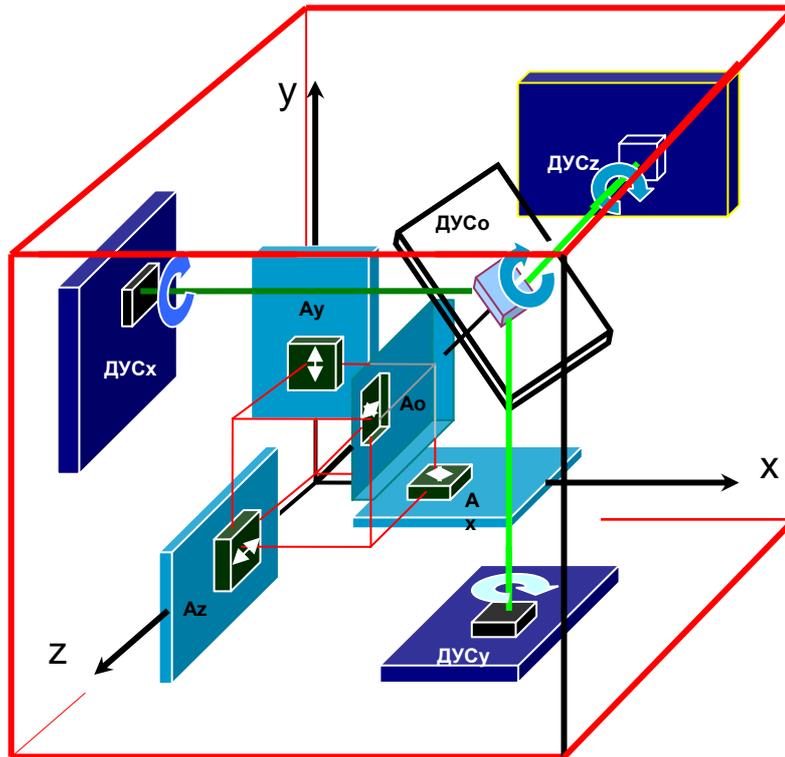


Рис.1. БИНС с минимальной структурной избыточностью

момент времени. Так как в БИНС БПЛА используются однотипные акселерометры и ДУСы, то выражения (6)–(7) с учетом введенных обозначений примут следующий вид:

$$U_{AK_0}(k) = (U_{AK_X}(k) + U_{AK_Y}(k) + U_{AK_Z}(k)) / \sqrt{3}; \quad (8)$$

$$U_{ДУС_0}(k) = (U_{ДУС_X}(k) + U_{ДУС_Y}(k) + U_{ДУС_Z}(k)) / \sqrt{3}. \quad (9)$$

Тождества (8) – (9) представляют собой математические модели номинального функционирования блоков акселерометров и ДУСов БИНС БПЛА.

На основании тождеств (8)–(9) получим диагностические МД-модели для решения первой задачи диагностирования – обнаружения отказов в блоках ДУС и акселерометров:

$$\Delta U_{AK_0}(k) = \tilde{U}_{AK_0}(k) - (\tilde{U}_{AK_X}(k) + \tilde{U}_{AK_Y}(k) + \tilde{U}_{AK_Z}(k)) / \sqrt{3}; \quad (10)$$

$$\Delta U_{ДУС_0}(k) = \tilde{U}_{ДУС_0}(k) - (\tilde{U}_{ДУС_X}(k) + \tilde{U}_{ДУС_Y}(k) + \tilde{U}_{ДУС_Z}(k)) / \sqrt{3}, \quad (11)$$

где $\Delta U_{AK_0}(k)$, $\Delta U_{ДУС_0}(k)$ – отклонения суммарных напряжений на A_x , A_y , A_z , ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z от напряжения на A_0 и ДУС₀, соответственно;

$\tilde{U}_{AK_X}(k)$, $\tilde{U}_{AK_Y}(k)$, $\tilde{U}_{AK_Z}(k)$, $\tilde{U}_{AK_0}(k)$, $\tilde{U}_{ДУС_X}(k)$, $\tilde{U}_{ДУС_Y}(k)$, $\tilde{U}_{ДУС_Z}(k)$, $\tilde{U}_{ДУС_0}(k)$ – напряжения на выходах датчиков A_x , A_y , A_z , A_0 , ДУС_x, ДУС_y, ДУС_z, ДУС₀ в k -й момент времени, соответственно.

На основании полученных диагностических моделей (10)–(11) формируем предикатные уравнения:

$$\lambda_0 = s_2 \left\{ \left| \Delta U_{AK_0}(k) \right| \leq \delta_0 \right\}_0^1; \quad (12)$$

$$\lambda_1 = s_2 \left\{ \left| \Delta U_{ДУС_0}(k) \right| \leq \delta_1 \right\}_0^1, \quad (13)$$

где λ_0 , λ_1 – двухзначные предикаты, описывающие процесс сравнения значений напряжений; s_2 – символ двухзначного предикатного уравнения; δ_0 , δ_1 – допустимые значения рассогласования сигналов, определяемые опытным путем.

Полученные предикатные уравнения (12)–(13) позволяют сформировать алгоритм для решения первой задачи диагностирования – обнаружение отказа в БИНС БПЛА.

После решения первой задачи диагностического

обеспечения необходимо снять следующую неопределенность – определение места возникновения отказа в БИНС БПЛА, т.е. определение непосредственно отказавшего датчика. Для реализации алгоритмов определения места отказа в БИНС в памяти микропроцессорной системы предусмотрено место для сохранения текущей информации на определенном диапазоне времени с шагом квантования $T_0 = 0,001$ с. Данные сохраняются по принципу «очередной входит и выходит». Это необходимо для того, чтобы в памяти хранились данные с датчиков до момента возникновения отказа в БИНС БПЛА («чистые данные»).

При возникновении отказа система диагностирования на основании предикатных уравнений (12) – (13) определяет момент времени возникновения отказа t_0 и последующие данные сохраняются в памяти как «грязные» – данные, полученные с БИНС БПЛА, в которой произошел отказ. Таким образом, система располагает данными с датчиков до момента возникновения отказа и после. Для датчиков БИНС БПЛА выходное напряжение можно представить в следующем виде при наличии отказа $U(t_0 - \Delta t) \neq U(t_0 + \Delta t)$, т.е. $\text{abs}(U(t_0 - \Delta t) - U(t_0 + \Delta t)) >$ или $U(t_0 - \Delta t) = U(t_0 + \Delta t) \pm \xi$; а при отсутствии отказа – $U(t_0 - \Delta t) \approx U(t_0 + \Delta t)$. В соответствии с высказанными предположениями предикатные уравнения для определения места отказа в БИНС БПЛА примут вид:

$$z_2 = s_2 \left\{ \left| U_{AK_x}(t_0 + \Delta t) - U_{AK_x}(t_0 - \Delta t) \right| \leq \delta_2 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } AK_x \end{cases}; \quad (14)$$

$$z_3 = s_2 \left\{ \left| U_{AK_y}(t_0 + \Delta t) - U_{AK_y}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_3 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } AK_y \end{cases}; \quad (15)$$

$$z_4 = s_2 \left\{ \left| U_{AK_z}(t_0 + \Delta t) - U_{AK_z}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_4 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } AK_z \end{cases}; \quad (16)$$

$$z_5 = s_2 \left\{ \left| U_{AK_0}(t_0 + \Delta t) - U_{AK_0}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_5 \right\} =$$

$$= \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } AK_0 \end{cases}; \quad (17)$$

$$z_6 = s_2 \left\{ \left| U_{DUC_x}(t_0 + \Delta t) - U_{DUC_x}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_6 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } DUC_x \end{cases}; \quad (18)$$

$$z_7 = s_2 \left\{ \left| U_{DUC_y}(t_0 + \Delta t) - U_{DUC_y}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_7 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } DUC_y \end{cases}; \quad (19)$$

$$z_8 = s_2 \left\{ \left| U_{DUC_z}(t_0 + \Delta t) - U_{DUC_z}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_8 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } DUC_z \end{cases}; \quad (20)$$

$$z_9 = s_2 \left\{ \left| U_{DUC_0}(t_0 + \Delta t) - U_{DUC_0}(t_0 - \Delta t) \right| < \delta_9 \right\} = \begin{cases} 0, \text{нет} \\ 1, \text{отказ } DUC_0 \end{cases}. \quad (21)$$

Полученные предикатные уравнения (14) – (21) отражают качественную связь места возникновения отказа с косвенными признаками в терминах булевой переменной. Использование этого обстоятельства позволяет представить решение задач диагностирования в форме дихотомического дерева, что позволяет перейти к решению важной задачи при построении диагностического обеспечения – построению правил поиска места отказов (ППМ) в БИНС БПЛА. Решение этой задачи основано на получении безусловных ППМ (рис. 2).

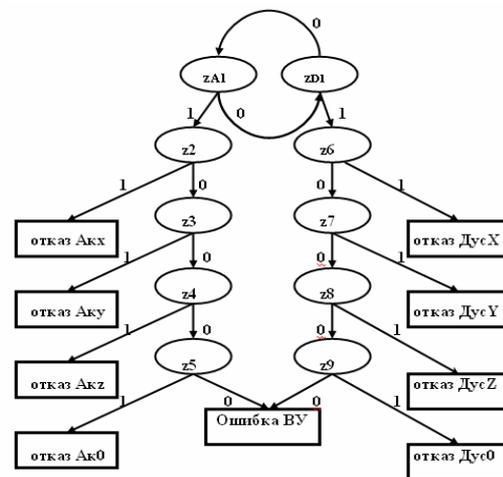


Рис.2. Фрагмент дихотомического дерева определения места отказа в БИНС БПЛА

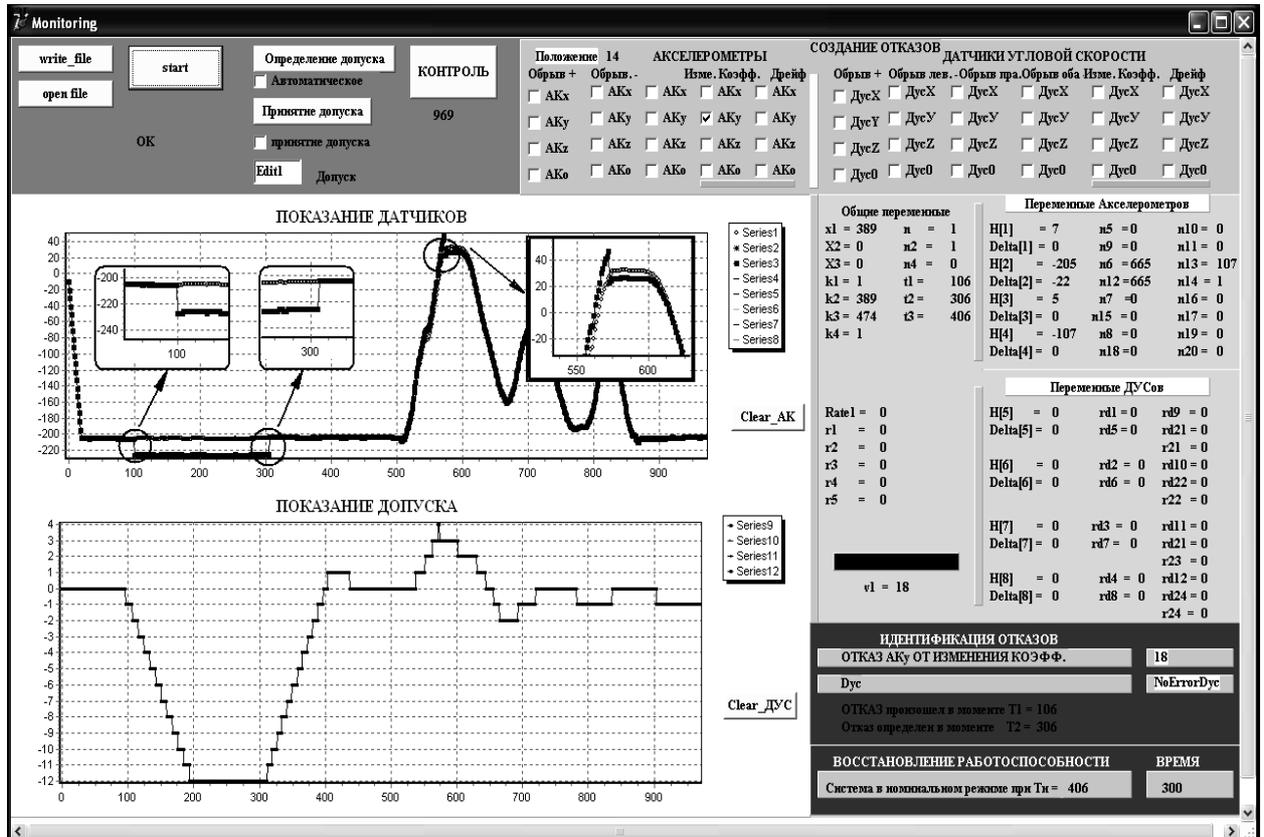
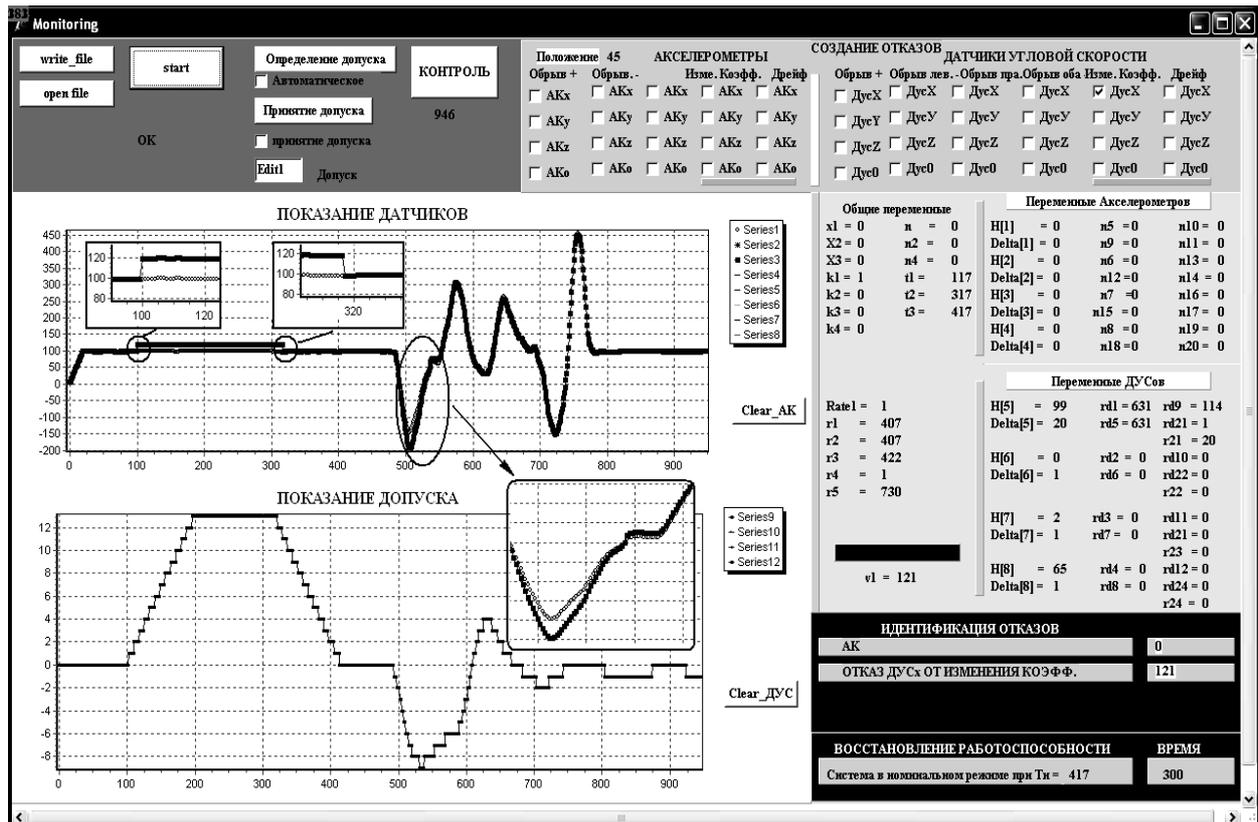


Рис. 3. Экспериментальное исследование алгоритмов диагностирования БИНС БПЛА

Полученные ППМ (рис. 2) представляют собой фрагмент логического графа поиска места отказа, в узлах которого находятся двухзначные предикаты (12) – (21), значения которых определяем через доступные измерению характеристики датчиков БИНС БПЛА [5].

Разработанное диагностическое обеспечение (рис. 2) в рамках сигнально-параметрического подхода позволяет решать две наиболее важные задачи диагностирования технического состояния БИНС БПЛА – установление факта возникновения отказа в БИНС и определения места его возникновения. Результаты экспериментального исследования разработанного алгоритмического обеспечения представлены на рис.3, где приведены интерактивные окна, в которых отражается текущая информация, поступающая от БИНС, его техническое состояние, и имеется возможность принудительного введения отказа, как оператором, так и самой системой методом случайных чисел в произвольные моменты времени. Как видно на рис. 3. оператором был введен ряд отказов, которые были продиагностированы системой, что подтверждает работоспособность полученных алгоритмов диагностирования БИНС БПЛА с глубиной до места отказа.

Двухзначные предикаты (14) – (21) описывают процесс сравнения невязок с допустимыми рассогласованиями. Если значение предиката равно «0», то рассогласование находится в допуске; если равно «1», то рассогласование находится не в допуске.

Заключение

Особенность разработанной конструкции БИНС БПЛА заключается в том, что такое размещение датчиков позволяет снимать неопределенности, связанные с моментом возникновения отказа и местом его появления. В дальнейшем также планируется спроектировать и

реализовать алгоритмы для решения оставшихся задач диагностического обеспечения – установления класса и вида отказов, что позволит решать задачу восстановления измерений БИНС БПЛА, обеспечивая тем самым ее активную отказоустойчивость.

Литература

1. Афонин А.А., Тювин А.В., Сулаков А.С. Анализ точности векторных гравиметрических измерений // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 3. – С. 25-29.
2. Гаврилин Б.Н., Саакян А.А., Штек С.Г. Метод увеличения срока службы БИНС путем коррекции погрешностей каналов измерения первичной инерциальной информации // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 10. – С. 59-62.
3. Лобусов Е.С. Особенности функционирования и анализ точности бесплатформенной инерциальной навигационной системы в режиме начальной выставки // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 10, приложение. – С. 9-13.
4. Погорелов В.А. О помехоустойчивой оценке вектора состояния бесплатформенной навигационной системы летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 9. – С. 14-17.
5. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
6. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т, 2000. – Вып. 15. – С. 18 – 31.

Поступила в редакцию: 11.03.2008

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