

УДК 681.5.09:629.783

**ВАН ТХИНЬ НГУЕН**

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

## МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*В статье рассмотрено применение системного подхода к обеспечению активной отказоустойчивости системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом вертикального взлета и посадки, основанного на диагностировании функционального состояния элементов системы с глубиной до вида отказа и гибком восстановлении работоспособности за счет использования имеющихся в наличии избыточных датчиков. Представлены результаты моделирования работы алгоритмов диагностирования и восстановления работоспособности на динамически подобной модели маневренного автономного летательного изделия (МАЛИ).*

**Ключевые слова:** *бесплатформенная инерциальная навигационная система, избыточность, отказ, диагностирование, восстановление, дихотомическое дерево, диагностический признак.*

### Введение

Одной из важных тенденций развития аэрокосмической техники для реализации конкретных целевых задач, связанных с наблюдением за определенными объектами движения с разной скоростью, обработками новых технологий создания перспективных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является создание беспилотных летательных аппаратов вертикального взлета и посадки. Кроме того, решение задач минимизации бортового оборудования летательных аппаратов (ЛА) без снижения показателей надежности и ресурса соответствующих систем и подсистем подчеркивает актуальность и необходимость создания БПЛА для решения разнообразных задач [1]. Самый распространенный и проверенный практикой подход обеспечения заданного уровня надежности - резервирование. Этот подход заключается в применении однотипных избыточных устройств, в том числе измерителей параметров движения объекта – линейного ускорения и угловой скорости. Но с одной стороны, этот подход уменьшает вероятность возникновения отказа, а с другой - пропорционально кратности резервирования увеличиваются массогабаритные и энергетические показатели, приводящие к уменьшению полезной нагрузки на борту ЛА и повышению стоимостных показателей аэрокосмических комплексов [2]. Устраняет отмеченные недостатки системный подход к обеспечению отказоустойчивости, заключающийся в глубоком диагностировании технического состояния системы управления ЛА и гибком ее восстановлении в режиме реального времени имеющимися в наличии избыточностями, которые заложены в систему в процессе ее проектирования или вводят-

ся искусственно.

Обеспечение отказоустойчивости систем управления БПЛА достигается путем обеспечения этим свойством элементов систем управления ЛА, к числу которых относятся и измерители параметров движения – бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС).

Мажоритарная, наиболее распространенная, схема размещения измерителей БИНС состоит из трех датчиков угловой скорости (ДУС) и трех акселерометров, оси чувствительности которых ортогональны друг другу и совпадают (или параллельны) с осями связанной с системой координат ЛА. Подобное расположение довольно простое и при незначительном усовершенствовании алгоритмов обработки измеряемой информации позволяет решать задачи глубокого диагностирования технического состояния измерительного блока и гибкого его восстановления в режиме реального времени. Однако подобная компоновка в три раза увеличивает энергопотребление, массогабаритные размеры и экономические показатели изделия, поэтому актуальна задача компоновки измерительных блоков ЛА с минимальной аппаратной избыточностью, позволяющих обеспечить уровень надежности соответствующей классической мажоритарной схемы.

### 1. Математическое описание движения МАЛИ

Движение маневренного автономного летательного изделия (МАЛИ), как твердого тела, в связанной системе координат описывается уравнениями Эйлера (шесть нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка). Силы и моменты,

входящие в эти уравнения, могут быть получены из законов сохранения количества и момента количества движения и в проекциях на оси связанной системы координат имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} m(\dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y) &= R_x; \\ m(\dot{V}_y + \omega_z V_x - \omega_x V_z) &= R_y; \\ m(\dot{V}_z + \omega_x V_y - \omega_y V_x) &= R_z. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x + (I_z - I_y) \omega_z \omega_y &= M_x; \\ I_y \dot{\omega}_y &= M_y; \\ I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_y \omega_x &= M_z, \end{aligned}$$

где  $m$  – масса МАЛИ;  $V_x, V_y, V_z$  – проекции вектора воздушной скорости;  $R_x, R_y, R_z$  – проекции вектора внешних сил, действующих на МАЛИ;  $I_x, I_y, I_z$  – осевые моменты инерции;  $M_x, M_y, M_z$  – проекции момента внешних сил.

В результате известных процедур линеаризации могут быть получены простейшие уравнения продольного движения МАЛИ, в том числе передаточная функция движения в канале тангажа по управляющему воздействию:

$$W_{\delta_B}^{\delta_B}(s) = \frac{\vartheta(s)}{\delta_B(s)} = \frac{-a_{23}(s - a_{25})}{s[s^2 + (a_{21} - a_{25})s + (a_{22} - a_{21}a_{25})]},$$

обозначим  $q_{11} = a_{21} - a_{25}$ ;  $q_{12} = a_{22} - a_{21}a_{25}$ ;  $q_{13} = -a_{23}$ ;  $q_{14} = -a_{23}a_{25}$ , тогда

$$W_{\delta_B}^{\delta_B}(s) = \frac{q_{13}s + q_{14}}{s^3 + q_{11}s^2 + q_{12}s}. \quad (2)$$

Передаточная функция МАЛИ в канале крена по управляющему воздействию в соответствии с (1) имеют вид:

$$W_{\gamma}^{\delta_{\ominus}}(s) = -\frac{\gamma(s)}{\delta_{\ominus}(s)} = -\frac{a_{32}}{s(s + a_{31})} = -\frac{K_{\ominus}}{s(T_{\ominus}s + 1)}. \quad (3)$$

Передаточная функция МАЛИ в канале рыскания по управляющему воздействию имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{\psi}^{\delta_H}(s) &= -\frac{\psi(s)}{\delta_H(s)} = \\ &= \frac{-a_{43}(s - a_{45})}{[s^2 + (a_{41} - a_{45})s + (a_{42} - a_{41}a_{45})]}. \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку в системе присутствуют АЦП и ЦАП, измерения и выработка управляющих воздействий производятся с временным интервалом  $T_0$ , а все процедуры обработки, преобразования и анализа осуществляются в микроконтроллерном вычислителе. Запишем уравнения, связывающие цифровые управляющие сигналы вычислителя и оцифрованные сигналы ДУС и акселерометров. При описании поведения непрерывной части объекта автоматического управления (ОАУ) в моменты времени  $kT_0$ ,  $k = 0, 1, \dots$  воспользуемся представлением производных в виде конечных разностей [4]. ОАУ является объек-

том с известным входом, диагностирование его функционального состояния осуществляется на основании разностного сигнала вектора измерений и выхода эталонной модели.

Следовательно, возможно определить систему уравнений, описывающую номинальное движение ОАУ в дискретном времени с учетом (2), (3) и (4). Для этого, в передаточных функциях каждого канала МАЛИ заменим конечными разностями.

Преобразуем (2) к виду:

$$\begin{aligned} &\frac{\vartheta(k+3) - 3\vartheta(k+2) + 3\vartheta(k+1) - \vartheta(k)}{\Delta T^3} + \\ &+ q_{11} \frac{\vartheta(k+2) - 2\vartheta(k+1) + \vartheta(k)}{\Delta T^2} + q_{12} \frac{\vartheta(k+1) - \vartheta(k)}{\Delta T} = \\ &q_{13} \frac{\delta_B(k+1) - \delta_B(k)}{\Delta T} + q_{14} \delta_B(k), \end{aligned}$$

следовательно, получим:

$$\begin{aligned} \vartheta(k+3) &= (3 - q_{11}\Delta T)\vartheta(k+2) + (2q_{11}\Delta T - q_{12}\Delta T^2 - 3)\vartheta(k+1) + \\ &+ (1 - q_{11}\Delta T + q_{12}\Delta T^2)\vartheta(k) + q_{13}\Delta T^2\delta_B(k+1) + \\ &+ (q_{14}\Delta T^3 - q_{13}\Delta T^2)\delta_B(k). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично (5) имеем:

$$\begin{aligned} \omega_z(k+2) &= (2 - q_{11}\Delta T)\omega_z(k+1) + (q_{11}\Delta T - q_{12}\Delta T^2 - 1)\omega_z(k) + \\ &+ q_{13}\Delta T\delta_B(k+1) + (q_{14}\Delta T^2 - q_{13}\Delta T)\delta_B(k). \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично, получаем машинную модель канала крена:

$$\begin{aligned} \gamma(k+2) &= (2 - a_{31}\Delta T)\gamma(k+1) + (a_{31}\Delta T - 1)\gamma(k) - a_{32}\Delta T\delta_{\ominus}, \\ \omega_x(k+1) &= (1 - a_{31}\Delta T)\omega_x(k) - a_{32}\Delta T\delta_{\ominus}(k). \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогично получим передаточную функцию и аналитическую машинную модель для канала рыскания:

$$\begin{aligned} \psi(k+3) &= (3 - a_{41}\Delta T)\psi(k+2) + (2a_{41}\Delta T - a_{42}\Delta T^2 - 3)\psi(k+1) + \\ &+ (1 - a_{41}\Delta T + a_{42}\Delta T^2)\psi(k) - a_{43}\Delta T^3\delta_H(k); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \omega_y(k+1) &= (2 - a_{41}\Delta T)\omega_y(k+1) + (a_{41}\Delta T - a_{42}\Delta T^2 - 1)\omega_y(k) - \\ &- a_{43}\Delta T^2\delta_H(k). \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, получена машинная модель, описывающая движение МАЛИ в номинальном режиме работы.

## 2. Определение параметров установки датчиков в измерительном блоке

В результате анализа используемых и перспективных схем установки датчиков угловой скорости необходимо выполнение двух требований к формированию измерительного блока для случая углового движения относительно двух осей базиса OXYZ, позволяющего обеспечить не только измерения параметров для задачи навигации и стабилизации, но и

диагностирование технического состояния измерителей с глубиной до вида отказов:

1. Минимально необходимое количество измерителей определяется следующим тождеством:

$$N = n + 2, \quad (10)$$

где  $n$  – количество степеней свободы по измеряемому параметру;  $N$  – минимально необходимое количество измерителей, обеспечивающих глубокое диагностирование при  $n$  степенях свободы.

2. Измерители необходимо компоновать относительно осей измерительной системы координат таким образом, чтобы выполнялось равенство:

$$L = N \text{ и } \Delta_i \neq 0, \forall i = 1, C_N^n, \quad (11)$$

где  $L$  – количество линейно независимых строк матрицы  $K$ ;  $K$  – матрица направляющих косинусов, характеризующая несовпадение осей чувствительности датчиков угловой скорости с измерительным базисом;  $C_N^n = \frac{N!}{2!n!}$ .

С учетом введенных условий исследуем размещение ДУС, представленное на рис. 1, без учета вращения.

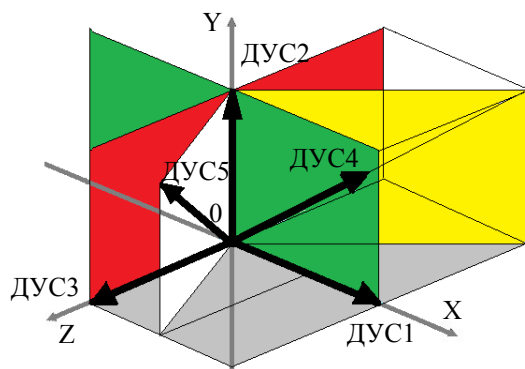


Рис. 1. Размещения ДУСов с учетом полной диагностируемости их блока

Несложно показать, что первое условие выполняется ( $N = 3 + 2 = 5$ ). Для определения выполнения второго условия получим математическую модель измерительного блока.

Три датчика ДУС1, ДУС2, ДУС3 ортогональны, поэтому найдем оптимальные углы размещения ДУС4, ДУС5 для того, чтобы выполнить условие (11).

Для получения значений оптимальных углов установки ДУС4 и ДУС5 используем критерий оценки эффективности, основанный на анализе следа корреляционной матрицы ошибок результирующего вектора угловой скорости.

$$F = \text{Sp}(D) = \sum_{i=1}^3 d_{ij}, \quad (12)$$

где  $D = [M^T M]^{-1}$  – корреляционная матрица ошибок результирующего вектора угловой скорости,  $K$  – матрица направляющих косинусов, определяющая взаимное расположение установочных векторов датчиков и осей МАЛИ.

Функция  $F$  – характеризует размерность распределения угловой скорости между всеми осями управления, а задача оптимизации сводится к минимизации ее значения.  $F$  – является гиперболической функцией и, соответственно, имеет один минимум, соответствующий определенным углам установки ДУСов.

Учитывая, что используются однотипные датчики, с учетом предложенной компоновки, оптимальные углы установки ДУС4, ДУС5 определяют вектором коэффициента матрицы  $K$ .

$$k_4 = [\cos\alpha_4 \quad \cos\beta_4 \quad \cos\gamma_4] = \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \frac{1}{\sqrt{3}} \quad -\frac{1}{\sqrt{3}} \right],$$

$$k_5 = [\cos\alpha_5 \quad \cos\beta_5 \quad \cos\gamma_5] = \left[ \frac{1}{4} \quad \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \frac{\sqrt{3}}{4} \right].$$

Математические модели номинального поведения датчика угловой скорости примут вид:

$$\begin{cases} \tilde{U}_1(t) = 1\omega_x(t) - 0\omega_y(t) - 0\omega_z(t); \\ \tilde{U}_2(t) = 0\omega_x(t) + 1\omega_y(t) - 0\omega_z(t); \\ \tilde{U}_3(t) = 0\omega_x(t) + 0\omega_y(t) + 1\omega_z(t); \\ \tilde{U}_4(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_x(t) + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_y(t) - \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_z(t); \\ \tilde{U}_5(t) = \frac{1}{4}\omega_x(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega_y(t) + \frac{\sqrt{3}}{4}\omega_z(t), \end{cases} \quad (13)$$

где  $\tilde{U}_i(t)$  – выходное напряжение  $i$ -го датчика угловой скорости ( $i = \overline{1,5}$ );  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции угловой скорости на оси измерительного трехгранника.

Запишем в векторном виде:

$$\tilde{\tilde{U}}(t) = K\bar{\Omega}(t), \quad (14)$$

$$\text{где } \tilde{\tilde{U}}(t) = \begin{bmatrix} \tilde{U}_1(t) \\ \tilde{U}_2(t) \\ \tilde{U}_3(t) \\ \tilde{U}_4(t) \\ \tilde{U}_5(t) \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{4} \end{bmatrix};$$

$$\bar{\Omega}(t) = \begin{bmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Уравнение (13) можно использоваться для автоматизации определения множества размещения датчиков с учетом полной диагностируемости с глубиной до вида отказа.

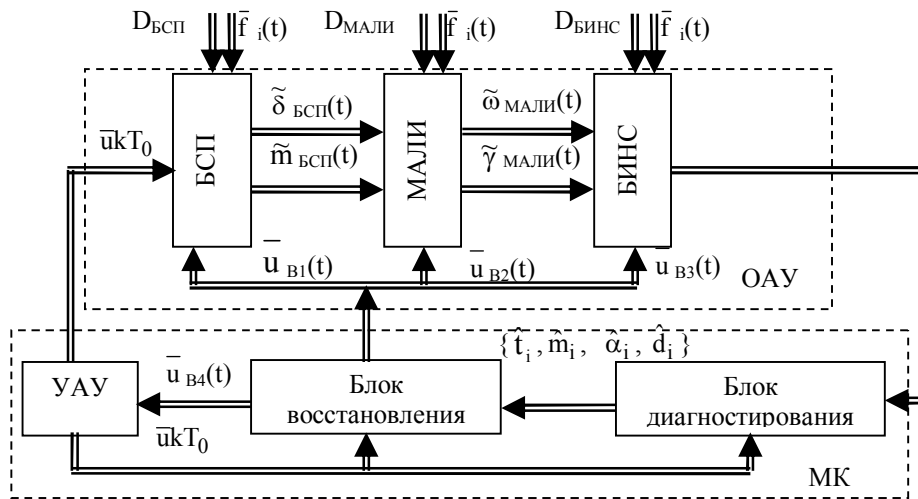


Рис. 2. Функціональна схема ОАУ со свойством активной отказоустойчивости

### 3. Диагностирование функциональной модели объекта управления

В работе МАЛИ рассматривается как комбинация устройства автоматического управления (УАУ) и объекта автоматического управления (ОАУ), а задача диагностирования сводится к определению функционального состояния ОАУ, включающего в себя сервоприводы и датчики обратной связи [5]. Схема, отражающая функциональный состав ОАУ со свойством активной отказоустойчивости, а также взаимосвязи между элементами системой управления и блоками диагностирования и восстановления, представлена на рис. 2. На функциональные элементы ОАУ в процессе его функционирования воздействуют внешние возмущения  $\bar{f}_i(t), i = \overline{1,3}$ , а также виды отказов из соответствующих множеств  $D_{\text{БСП}}$ ,  $D_{\text{БИНС}}$  и  $D_{\text{МАЛИ}}$ , приводящие к отклонению углового положения и скорости вращения МАЛИ, а также показаний датчиков от своих номинальных значений.

Блок диагностирования на основании сигналов управления, а также доступных измеренных сигналов с БСП  $\bar{u}_{\text{БСП}}(t)$  и БИНС  $\bar{u}_{\text{БИНС}}(t)$  решает задачи диагностирования ОАУ и выработывает сигналы, характеризующие момент обнаружения отказа  $\hat{t}_i$ , его принадлежность к определенному месту  $\hat{m}_i$ , классу  $\hat{\alpha}_i$  и виду  $\hat{d}_i$ . Полученные значения передаются на блок восстановления, который осуществляет выбор средства парирования обнаруженного вида отказа и формирует соответствующие сигналы  $\bar{u}_{vi}(t), i = \overline{1,4}$  на УАУ и функциональные элементы ОАУ для восстановления работоспособности объекта.

Рассмотрим номинальное движение ОАУ с блоком БИНС и БСП в связанной с МАЛИ системе

координат, представив БПЛА абсолютно жестким телом, содержащим движущиеся массы, при этом датчики угловой скорости, акселерометры и БСП описываются как линейные звенья.

Передаточная функция датчика угла:

$$W_{\text{ДУ}}(s) = \frac{U_{\text{ДУ}}(s)}{\theta(s)} = K_{\text{ДУ}}(s). \quad (16)$$

Передаточная функция датчика угловой скорости:

$$W_{\text{ДУС}}(s) = \frac{U_{\text{ДУС}}(s)}{\omega_z(s)} = K_{\text{ДУС}}(s). \quad (17)$$

Передаточная функция рулевого привода имеет вид:

$$W_{\text{СП}}(s) = \frac{\delta_{\text{СП}}(s)}{f(s)} = K_{\text{СП}}(s). \quad (18)$$

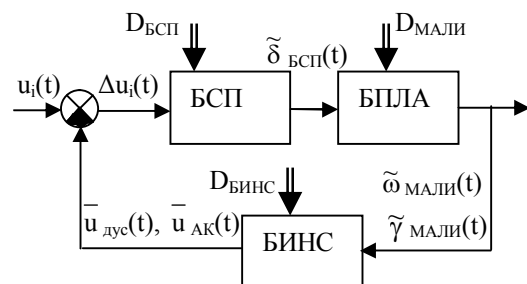


Рис. 3. Функціональна схема управління МАЛИ

Под видом отказа функционального элемента понимается любое отклонение статической или динамической характеристики объекта от номинальной. Отказы могут быть вызваны изменением параметров элементов в процессе эксплуатации: уменьшением коэффициента передачи, увеличением постоянной времени, дрейфами и резким изменением характеристик элемента вследствие обрывов, коротких замыканий и т.д. В работе сделано предположе-

ние, что в БПЛА имеют место отказы, связанные с дрейфом датчика угловой скорости. Показатель отказавшего датчика постоянно увеличивается на величину дрейфа. Дрейф ДУС соответственно, влияет на сигнал управления, который обрабатывает входной сигнал, таким образом, чтобы уменьшать влияние дрейфа. Множество видов отказов ОАУ содержит в себе множества видов отказов его функциональных элементов и включает 58 видов отказов. В результате параметризации отказов виды отказов были объединены в классы, характеризующиеся изменением одного из параметров математической модели ОАУ. Множество классов отказов содержит

22 элемента, являющихся прямыми диагностическими признаками отказа:

$$D = \{ \tilde{u}_{дус1}, \dots, \tilde{u}_{дус5}, \tilde{u}_{АК1}, \dots, \tilde{u}_{АК5}, \tilde{u}_{др.дус1}, \dots, \tilde{u}_{др.дус5}, \tilde{u}_{др.АК1}, \dots, \tilde{u}_{др.АК5}, k_{дус1}, \dots, k_{дус5}, k_{АК1}, \dots, k_{АК5}, \tilde{u}_{СП1}, \dots, \tilde{u}_{СП4}, d_{СП1}, \dots, d_{СП4}, k_{СП1}, \dots, k_{СП5}, \tilde{u}_{П1}, \dots, \tilde{u}_{П8}, k_{П1}, \dots, k_{П8} \}. \quad (19)$$

Модель движения МАЛИ, при наличии в нем отказов, получена на основании системы (5) – (9) и множества прямых диагностических признаков. При этом осуществлен переход к математическому описанию в рекуррентно-разностной матричной форме уравнений движения МАЛИ.

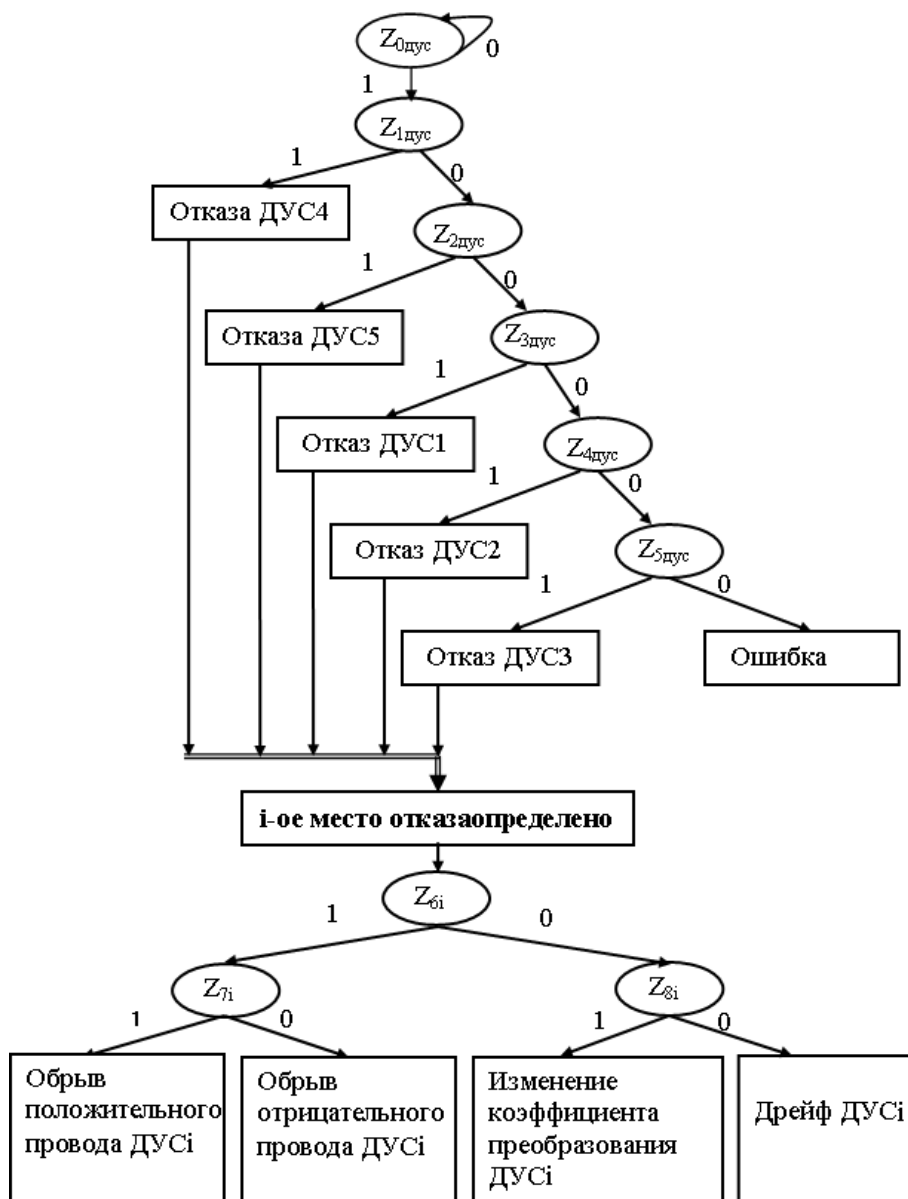


Рис. 4. Фрагмент дихотомического дерева, поиск отказавшего элемента в БИНС

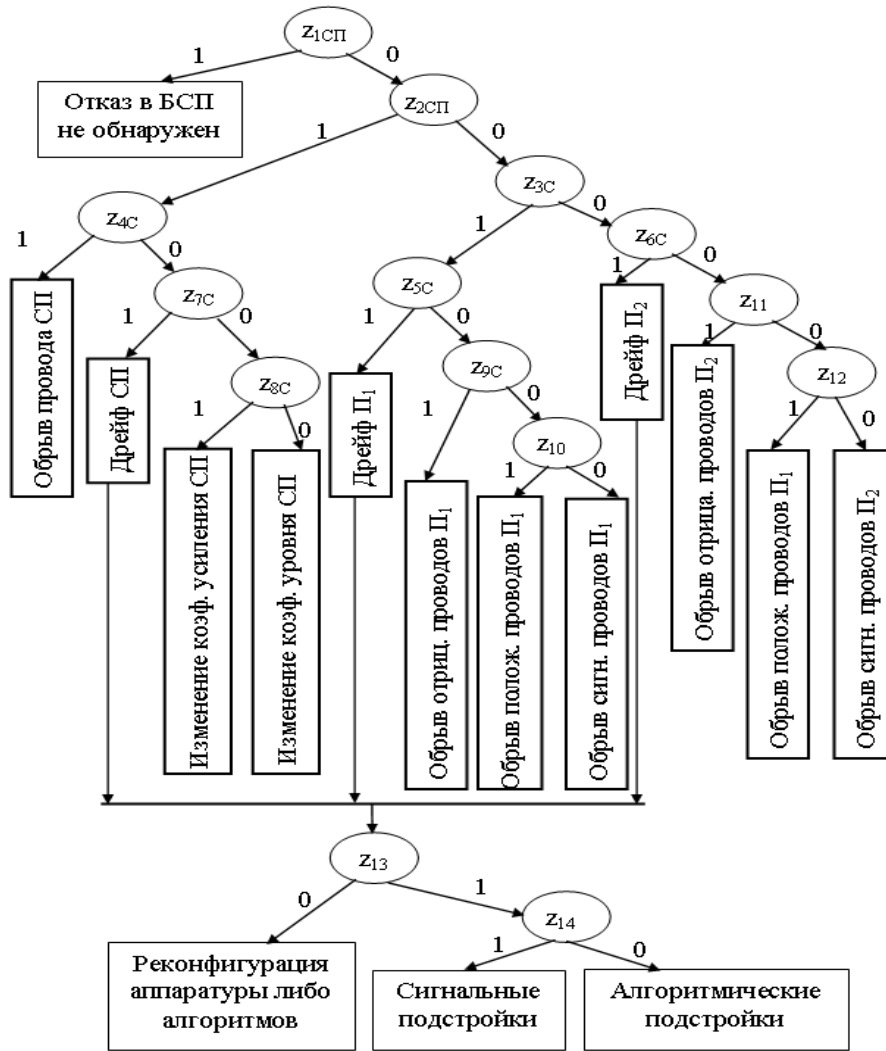


Рис. 5. Фрагмент дихотомического дерева, определение места и класс отказа в БСП

В результате исследований полностью диагностируемых, относительно момента появления отказа, осуществляется переход из шкалы отношений, в которых измеряются составляющие вектора  $\Delta u(k)$ , в шкалу наименований, в которой в качестве косвенных диагностических признаков используются булевы переменные  $z_i$ , рассчитываемые на основании следующего двухзначного предикатного уравнения [1]

$$z_i = S\{\Delta u_i\} = \begin{cases} 1, & \text{если } |\Delta u_i(k)| > \delta_i; \\ 0, & \text{если } |\Delta u_i(k)| \leq \delta_i, \end{cases} \quad (20)$$

где  $\Delta u_i(k)$  – отклонение  $i$ -го косвенного диагностического признака при изменении  $i$ -го прямого диагностического признака;  $\delta_i$  - допуск на  $i$ -й косвенный диагностический признак,  $S$  – символ двухзначного предиката.

Булева переменная  $z_i$  принимает значение «1» в случае, если наличие прямого признака отказа вызывает отклонение  $i$  – й составляющей вектора косвенных диагностических признаков, превышающее значение допуска  $\delta_i$  и равняется «0» в противополож-

ном. Процедуру обнаружения отказа представим в виде дихотомического дерева (рис. 4).

Таким образом, из функционального уравнения (20) получаем, что для обнаружения отказа в ОАУ достаточно обработки отклонений показаний двух ДУС от их оценочных значений

$$\Delta u_i(k)^T = [\Delta u_{ДУСm}(k), \Delta u_{ДУСl}(k)]; m, l = \overline{1..5}. \quad (21)$$

Для определения диапазона изменения составляющих вектора  $\Delta u_m(k)$  ограничим множество параметров ОАУ только параметрами отказов  $\Delta \lambda_i$ . Их влияние на косвенные диагностические признаки  $\Delta u_{mi}(k)$  можно представить через функции  $\varphi_{ij}(\Delta \lambda_i)$ :

$$\Delta u_{mi} = \varphi_{ij}(\Delta \lambda_j), i = \overline{1..5}. \quad (22)$$

Каждый из функциональных элементов ОАУ, характеризуется набором прямых диагностических признаков, отображаемых, в свою очередь, на множестве косвенных признаков  $z_i$ . Анализ таблицы, составленной из этих признаков и содержащей количество строк, равное количеству прямых признаков отказов и количество столбцов, равное количе-

ству измеряемых сигналов и являющейся диагностической логической моделью системы, позволил определить правила первого уровня классификации отказа. Анализ отклонений вектора измерений от выхода номинальной модели позволяет определить место возникновения отказа с точностью до элемента, для отказа БИНС и БСП.

На рис. 4 и 5 представлены фрагменты алгоритмов поиска места и определения класса отказов.

*Определение вида отказа в элементах БИНС.* Каждый класс отказов включает в себя в общем случае несколько видов отказов  $d_i \in D_{\text{БИНС}}$ . Появление того или иного вида отказа представляет собой неопределенное событие. Для определения конкретного вида отказа в каждом классе требуется разработать соответствующую процедуру, позволяющую, в результате определенной обработки выходных данных и классификации отказов, установить вид текущего отказа в БИНС  $d_i$  и численное значение признака вида  $\Delta \hat{d}_i$ . Следовательно, четвертую основную задачу диагностирования – определение вида отказа – декомпозируем на четыре взаимосвязанные задачи: получение оценочных значений прямых признаков отказов  $\Delta \hat{d}_i$ ; создание модели видов отказов; формирование признакового пространства видов отказов; построение правил определения видов отказов.

#### 4. Восстановление работоспособности ОАУ МАЛИ

Восстановление работоспособности – процесс перевода объекта из неработоспособного состояния в работоспособное.

Характеристики отказов, такие как: время обнаружения, место, класс и вид, полученные в результате диагностирования ОАУ, представляют собой основу для следующего этапа обеспечения активной отказоустойчивости – восстановления отказов за счет использования имеющихся в объекте структурной, функциональной и информационной избыточностей.

Наиболее распространенными средствами восстановления отказов, применимыми на МАЛИ, являются сигнальная и параметрическая подстройка, а также реконфигурация аппаратуры и алгоритмов управления (рис. 6).

В соответствии с системным подходом к обеспечению активной отказоустойчивости, при разработке процедур парирования отказов осуществляется исследование ОАУ, включающее следующие этапы: определение для каждого вида отказа всех возможных вариантов его восстановления, за счет имеющихся в наличии избыточных средств; выде-

ление из всего множества вариантов парирования подмножеств, характеризующих элементный и системный уровни обеспечения отказоустойчивости; установление для каждого вида отказа относительного приоритета, необходимого для формирования процедуры эффективного использования соответствующих избыточностей. При этом, процедуры восстановления работоспособности, относящиеся к элементному уровню обеспечения отказоустойчивости, зачастую имеют наивысший приоритет, а процедуры, относящиеся к системному уровню, вызываются только после того как все ресурсы элементного уровня исчерпаны.

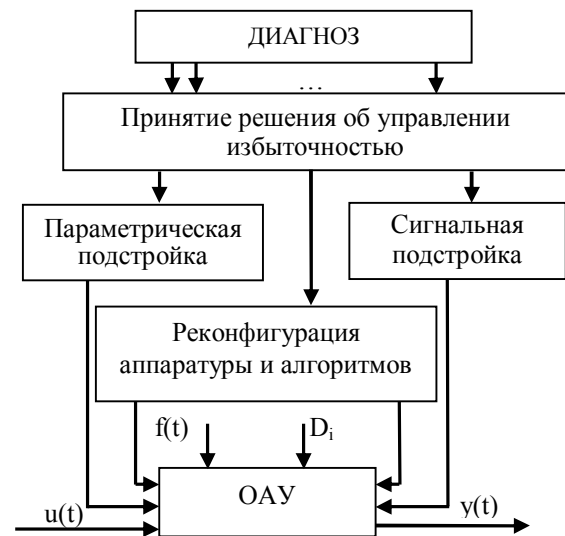


Рис. 6. Средства парирования отказов ОАУ

Особенность метода 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 отказавшего 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 к возможным видам отказов. Для организации сигнальной подстройки в микропроцессорной системе предусмотрены специальные алгоритмы, которые на основании диагностической информации корректируют сигналы с выходов датчиков. Для данной БИНС удастся восстановить работоспособность при отказе вследствие дрейфа либо при изменении коэффициентов. Про-

цедура восстановления работоспособности происходит после определения величины дрейфа отказавшего датчика, записываемой в память. Если величина дрейфа описывается как  $U_j^0 = \tilde{U}_j(k) - \hat{U}_j(k)$ , то величина, необходимая для парирования будет определяться следующим соотношением:

$$\tilde{U}_j(k)_{\text{пари}} = \tilde{U}_j(k) - U_j^0.$$

Для видов отказов связанных с изменением коэффициентов, если определено изменение коэффициента:

$$\Delta K_i = \frac{\tilde{U}_i(k) - \hat{U}_i(k)}{\hat{U}_i(k)},$$

тогда формируется величина компенсации:

$$\tilde{U}_i(k)_{\text{пари}} = \frac{\tilde{U}_i(k)}{1 + \Delta K_i};$$

где  $i, j$ - отказавшие датчики. Таким образом, разработан процесс восстановления работоспособности блока датчиков БИНС, включающий в полной мере процедуры диагностирования.

Анализ множества видов отказов в данном БСП показывает что, множество компенсируемых отказов состоит из следующих элементов: дрейф сервопривода (положительный или отрицательный); изменение коэффициента СП; дрейф и изменение коэффициента потенциометра П1; дрейф и изменение коэффициента потенциометра П2. Для компенсации этих видов отказов синтезированы диагностические функциональные модели (ДФМ) [1], обеспечивающие решение обратной задачи, связанной с определением величины классов отказов. Полученные оценки классов отказов, как и для случая с БИНС, применяются для реализации определенных алгоритмов восстановления работоспособности БСП.

В случае некомпенсируемых отказов сервопривода для обеспечения номинального функционирования систем управления необходимо синтезировать процессы реконфигурации алгоритмов управления, основанные на симметричном свойстве расположения органов каждого канала МАЛИ. В БСП применяются два СП с целью повышения эффективности работы каждого канала управления, а также для обеспечения их отказоустойчивости. В номинальном режиме оба блока сервоприводов работают совместно, отказ одного из них приводит к необходимости изменения эффективности другого блока для обеспечения нормальной работы систем соответствующего канала. Неисправный блок будет полностью отключен от системы.

## 5. Экспериментальная отработка отказоустойчивой системы управления БПЛА

Отладка алгоритмов диагностирования функционального состояния и восстановления работоспособности ОАУ в составе системы управления проводилась на специализированном аппаратно-программном комплексе (АПК), представленном на рис. 7.



Рис. 7. Установка для исследования САУ МАЛИ

Принцип работы и роль каждого устройства стенда по следующим параметрам:

1. Компьютер, на котором установлено программное обеспечение, состыкован с микроконтроллером (бортовым вычислителем). Он обеспечивает процесс перепрограммирования бортового вычислителя через программатор и обмен информацией с микроконтроллером через шину USB. На экране компьютера отображается интерфейс, который позволяет отслеживать состояние измеряемых и прогнозируемых переменных (рис. 7, 8).

2. Микроконтроллер обрабатывает информацию с датчиков и формирует управляющие и коррекционные сигналы на основании получаемой информации с датчиков угловой скорости, акселерометров либо магнитного компаса или от GPS. Цифровой код преобразуется в ШИМ для управления СП.

3. Радиоуправление представляет собой аварийный канал управления мощностью двигателя через регулятор хода сигналом ШИМ.

4. Блок питания обеспечивает номинальную работу двигателя и сервоприводов при испытании МАЛИ в лабораторных условиях.

5. Модель МАЛИ, в которой установлено все бортовое оборудование.



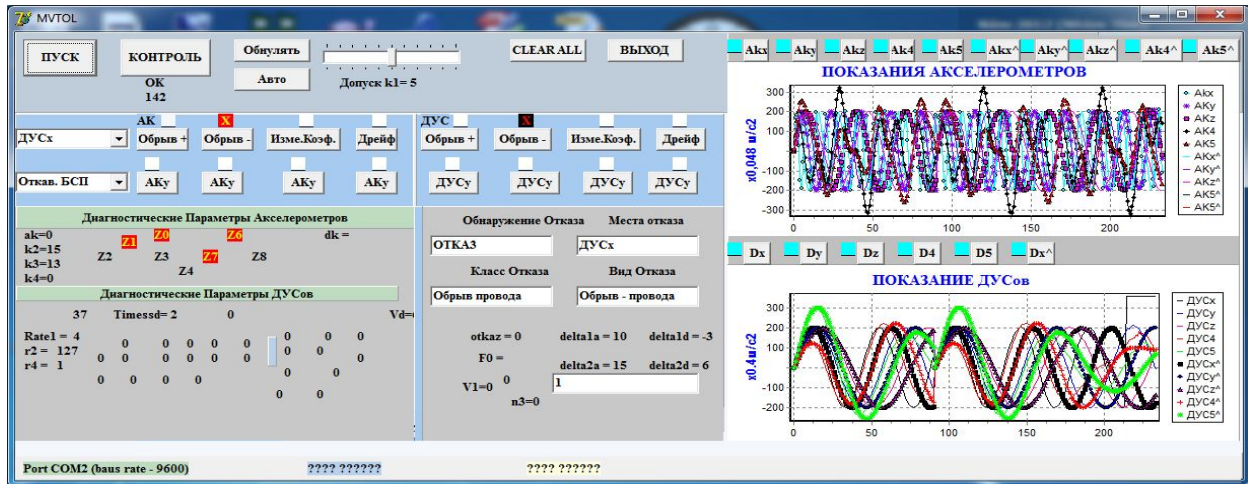


Рис. 8. Основное окно программы визуализации результатов и задания режима работы системы

Для определения параметров математической модели номинального поведения ОАУ была проведена параметрическая идентификация его элементов. Для оценки параметров был использован не рекуррентный метод наименьших квадратов, позволяющий по наблюдению входных и выходных сигналов элементов определить параметры линейного дифференциального уравнения известной структуры. Так как уравнения, описывающие движение БПЛА содержат в себе нелинейности, для оценки параметров был предложен метод, основанный на использовании для процедур идентификации входных сигналов целенаправленно искаженных по результатам на наблюдения его выходных сигналов эквивалентно влиянию нелинейностей. Имитация отказов производилась как программным, так и аппаратным способом [2]. Программная имитация отказов позволила вводить в систему многократные отказы БПЛА без существенного усложнения конструкции стенда. При этом, программный имитатор отказов (ПИО) искажает управляющие сигналы эквивалентно действию задаваемого вида отказа (рис.9).

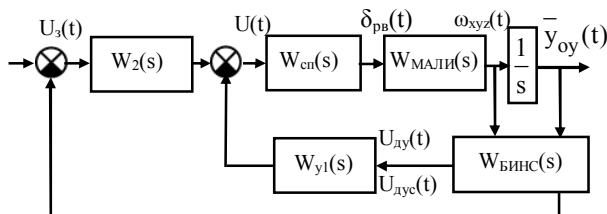


Рис. 9. Функциональная схема ОАУ МАЛИ

На рисунке 10 представлены графики изменения угловой скорости, а также введены следующие обозначения моментов времени:  $t_0$  - введения отказа в систему;  $t_{об}$  - обнаружения отказа системой;  $t_c$  - начало восстановления сигнальной подстройки;  $t_b$  - момент времени завершения процедуры восстановления.

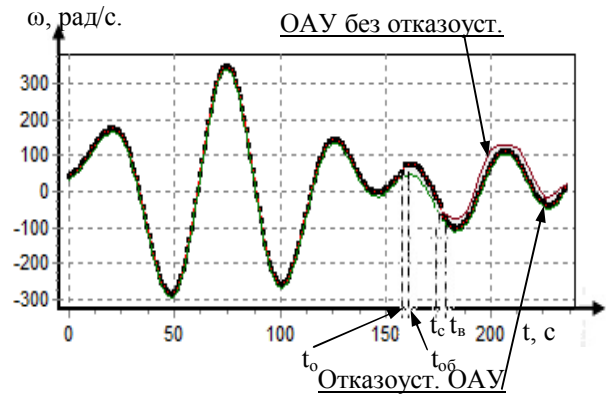


Рис. 10. Экспериментальное исследование диагностирования и восстановления при дрейфе датчика угловой скорости

Комплексное исследование работы системы управления на заданном множестве видов отказов показало, что все виды отказа были обнаружены подсистемой диагностирования, определено место возникновения, класс и вид отказа и получены оценочные значения прямых признаков отказов. Среднее время восстановления составило  $t_{вос} = 2,4$  с.

### Заклучение

В результате анализа функциональных зависимостей, связывающих значение следа корреляционной матрицы ошибок, результирующего вектора управления с углами установки датчиков БИНС, получены аналитические зависимости для определения параметров установки минимально-избыточного количества датчиков угловой скорости и акселерометров на БИНС, обеспечивающая отказоустойчивую работу системы.

С использованием полученных диагностических моделей разработаны алгоритмы оперативного диагностирования технического состояния БИНС и

БСП в виде дихотомических деревьев обнаружения отказов, поиска места отказа, определения класса и установления вида отказа. 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 для каждой задачи диагностирования.

Предложено использование подобной модели с программным имитатором отказов для отладки алгоритмов диагностирования функционального состояния и восстановления работоспособности СУ МАЛИ в наземных условиях. Результаты экспериментального исследования отказоустойчивого ОАУ подтвердили результаты теоретических исследований работы, адекватность разработанных математических моделей движения ОАУ, а также работоспособность алгоритмов глубокого диагностирования и гибкого восстановления в режиме реального времени. Предложенный подход к обеспечению активной отказоустойчивости позволил сохранить работоспособность ОАУ при однократных отказах, связанных с переходом одного из элементов системы управления в предельное состояние и многократных отка-

зах, связанных с отклонением параметров ОАУ от номинальных значений.

## Литература

1. Кулик, А.С. *Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы [Текст] / А.С. Кулик // Авиационно-космическая техника и технология. – 2000. – Вып. 15. – С. 18-31.*
2. *Восстановление измерений навигационной системы в режиме реального времени [Текст] / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, Куок Туан До, О.Ю. Златкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – Вып. 5 (52). – С. 28-33.*
3. *Распопов, В.Я. Микросистемная авионика: учебное пособие [Текст] / В.Я. Распопов. – Тула: «Гриф и К», 2010. – 248 с.*
4. *Кулик, А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления [Текст] / А.С. Кулик. – Х.: ХАИ, 1991. – 91 с.*
5. *Фирсов, С.Н. Малогабаритный летательный аппарат вертикального взлета и посадки [Текст] / С.Н. Фирсов, Ван Тхинь Нгуен // «Научные исследования – теория и эксперимент 2010»: материалы шестой международной научно-практической конференции, г. Полтава, 17-19 мая 2010 г. - Полтава: Изд-во «ИнтерГрафіка», 2010. – Т.6 – С. 95 – 97.*

Поступила в редакцию 14.09.2012

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

## МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Ван Тхинь Нгуен*

У статті розглянуто застосування системного підходу до забезпечення активної відмовостійкості системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом вертикального зльоту і посадки, засновано на діагностуванні функціонального стану елементів системи з глибиною до виду відмови та гнучкому відновленні працездатності за рахунок використання існуючих в наявності надлишкових датчиків. Представлено результати моделювання роботи алгоритмів діагностування і відновлення працездатності на динамічно подібній моделі маневреного автономного літального виробу (МАЛІ).

**Ключові слова:** бесплатформна інерціальна навігаційна система, надмірність, відмова, діагностування, відновлення, дихотомічне дерево, діагностична ознака.

## THE METHOD PROVISION OF A FAULT TOLERANT FOR CONTROL UNMANNED AERIAL VEHICLES

*Van Think Nguyen*

In this paper is presented the application of an active fault tolerant and automatic control systems for a vertical takeoff and landing UAV, based on the diagnostics functional state of the system's elements with determination of kind of fault and flexible performances recovery by using available sensors redundancies. The simulation results of the diagnostic algorithms and system's recovery are presented in a similar dynamic model of maneuverable autonomous aircraft object (MALI).

**Keywords:** strapdown inertial navigation system, redundancy, failure, diagnosis, repair, dichotomous tree, diagnostic feature.

**Нгуен Ван Тхинь** – аспирант кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: thinkthk@gmail.com.