

УДК 629.735.054 (083)

А. М. СУББОТА, В. Ф. СИМОНОВ, В. А. ХЛИВНЮК

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

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ БЛОКОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается проблема проектирования отказоустойчивых систем управления, в структуре которых предусматривается наличие блока диагностирования. Для построения алгоритмов работы блоков диагностики как линейных, так и нелинейных систем рассмотрена возможность формирования вектора отказов путем введения его компонент в соответствующие составляющие вектора измерений. Поскольку, вследствие отказа одного из функциональных элементов, входящих в структуру системы, происходят соответствующие изменения переменных вектора состояния, то полученная разность между составляющими вектора измерения до события отказа в одном из элементов системы и после него позволяет сформировать алгоритм функционирования блоков диагностики.

Ключевые слова: алгоритм, вектор состояния, вектор измерения, вектор отказов, канал крена, канал рыскания, блоки диагностики.

Введение

Данный вопрос будем рассматривать по отношению к автономной системе автоматического управления (САУ) транспортным средством. При этом САУ транспортного средства спроектирована так, что автоматически обеспечивается устойчивость, управляемость, наблюдаемость, а также диагностируемость одиночных дестабилизирующих воздействий, то есть транспортное средство представляется как объект рационального управления (ОРУ), базирующегося на принципе формирования управляющего воздействия по диагнозу нештатной ситуации [1].

Таким образом, основной задачей блока диагностики любой рациональной системы управления является обнаружение отказа, выявление места, класса и вида отказа. При этом считаем, что достижение требуемого уровня отказоустойчивости динамической системы достигается за счет следующих основных процедур [1]:

- 1) обнаружение дестабилизирующего воздействия;
- 2) анализ и идентификация дестабилизирующего воздействия;
- 3) восстановление требуемого уровня работоспособности объекта рационального управления.

С целью конкретизации рассматриваемого вопроса в дальнейшем под дестабилизирующим воздействием будем понимать отказ работоспособности одного из функциональных узлов, входящих в состав системы.

Считаем, что отказать может любой функцио-

нальный элемент. При этом необходимо обнаружить факт отказа, найти место отказа, определить класс и вид отказа, принять рациональное решение о способе парирования отказа.

Традиционные методы диагностики отказов включают ограничители или специальные тестовые сигналы, которые дают возможность определения или установление факта возникновения дефекта или отказа. В случае отказа одного из функциональных элементов система диагностики отключает отказавший компонент и заменяет его резервным. При этом для повышения отказоустойчивости блоков или систем на таких объектах как ракеты-носители, космические аппараты, самолеты используют принцип троирования или так называемый принцип «два из трех». Однако такие средства отказоустойчивости могут быть применены при обеспечении безопасности полетов важнейших и дорогостоящих объектов.

Постановка задачи исследования

При большой номенклатуре элементов, находящихся в пределах одного изделия, применение метода троирования даже при современном уровне развития промышленности является невозможным. Поэтому современные методы диагностики и повышения отказоустойчивости должны базироваться на алгоритмических методах сокращения количества элементов, основываясь на соответствующих математических моделях и диагностических алгоритмах.

Отсюда вытекают задачи о рассмотрении вопроса правомерности применимости идентичности подходов к разработке блоков диагностики как для

линейных, так и для нелинейных систем при условии, что для их функционирования не допускается использование дополнительных аппаратных средств и перевода динамической системы при её штатном функционировании в режим отработки пробных сигналов для идентификации отказавших блоков.

Получение информации о возникновении отказа при функционировании нелинейной системы

Рассмотрим в общем виде применение алгоритмического резервирования, применительно к нелинейной системе, считая, что состоянию нормального функционирования соответствует «вектор отказов» $f(t)=0$ [3,4]. В качестве примера рассмотрим обобщенную систему второго порядка, описываемую следующими нелинейными уравнениями состояния и измерений:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -X_1 + X_2^2 + U + f_1; \\ \dot{X}_2 = -2X_2 + f_2; \\ Y = X_1 + f_3, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{f} = [f_1, f_2, f_3]^T$ – вектор отказов;

$\bar{X} = [X_1, X_2]^T$ – вектор состояний;

U – управление.

После дифференцирования третьего уравнения системы (1) и совместного решения с первым уравнением, получим:

$$\dot{Y} = -X_1 + X_2^2 + U + f_1 + \dot{f}_3. \quad (2)$$

Далее найдем вторую производную выражения (2) и, учитывая первое и второе уравнение системы (1), получим:

$$\ddot{Y} = X_1 - 5X_2 + \dot{U} + \dot{f}_1 + f_3 - f_1. \quad (3)$$

На основании выражений (1), (2) и (3) имеем следующие составляющие состояния вектора измерений:

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} Y \\ \dot{Y} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 + f_3 \\ -X_1 + X_2^2 + U + f_1 + f_3 \\ X_1 - 5X_2 + \dot{U} + U + \dot{f}_1 + f_3 - f_1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для нормально функционирующей системы вектор измерений представим в виде:

$$\bar{Y}_0 = \begin{pmatrix} Y_0 \\ \dot{Y}_0 \\ \ddot{Y}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ -X_1 + X_2^2 + U \\ X_1 - 5X_2 + \dot{U} - U \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Совместное решение выражений (4) и (5), осуществляемое блоком диагностики, позволяет найти составляющие f_i , $i = \overline{1,3}$ вектора отказа:

$$\Delta \bar{Y} = \begin{pmatrix} Y - Y_0 \\ \dot{Y} - \dot{Y}_0 \\ Y - Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_3 \\ f_1 + f_3 \\ \dot{f}_1 - f_1 + f_3 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Таким образом, на базе анализа изменений составляющих вектора измерений может быть установлена природа составляющих вектора отказов, их вид, класс и соответственно выработан алгоритм реконфигурации системы с целью восстановления требуемого уровня работоспособности объекта рационального управления.

Получение информации о возникновении отказа при функционировании линейной системы

В качестве исходной системы выберем канал крена самолета со статическим автопилотом. Уравнение, описывающее движение самолета по углу крена, представлено в виде уравнения, описывающего вход-выход системы управления [2]:

$$(s^2 + n_{22}s)\Gamma(s) = -n_{\Delta}\Delta_{\Delta}(s), \quad (7)$$

где n_{22} и n_{Δ} – постоянные коэффициенты, характеризующие соответственно динамику самолета по крену и эффективность его органов управления по крену, то есть элеронов,

$$\Delta_{\Delta}(s) = K_{\gamma}(\Gamma(s) - \Gamma_3(s)) + K_{\dot{\gamma}}s\Gamma(s). \quad (8)$$

Структурная схема канала крена со статическим автопилотом представлена на рис. 1

Решая уравнение (7) соответственно с уравнением (8), получим:

$$(s^2 + a_1s + a_2)\Gamma(s) = a_2\Gamma_3(s), \quad (9)$$

где $a_1 = n_{22} + n_{\Delta}K_{\dot{\gamma}}$; $a_2 = n_{\Delta}K_{\gamma}$.

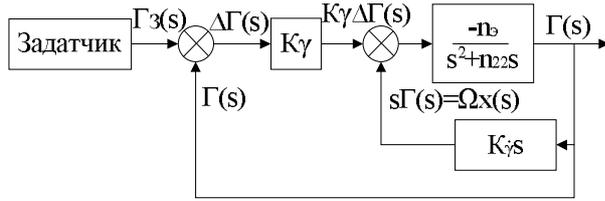


Рис. 1. Структурная схема канала крена со статическим автопилотом

Выражение (9) запишем в таком виде:

$$\ddot{\gamma} + a_1 \dot{\gamma} + a_2 \gamma = a_2 \gamma_3, \quad (10)$$

откуда

$$\ddot{\gamma} = -a_2 \gamma - a_1 \dot{\gamma} + U, \quad (11)$$

где $U = a_2 \gamma_3$ – задающее воздействие.

Для системы второго порядка могут быть введены две переменные вектора состояния:

$$\begin{cases} X_1 = \gamma; \\ X_2 = \dot{\gamma} = \omega_X, \end{cases} \quad (12)$$

где γ и ω_X – угол и угловая скорость крена, которые измеряются соответственно датчиком крена (ЦГВ) и датчиком угловой скорости (ДУС).

Тогда уравнения состояния и выхода могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_1 - a_1 X_2 + U; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} Y_1 = X_1; \\ Y_2 = X_2. \end{cases} \quad (14)$$

При наличии отказа в системе выражения (13) и (14) запишем в таком виде:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 + f_3; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_1 - a_1 X_2 + U + f_2; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} Y_1 = X_1 + f_3; \\ Y_2 = X_2 + f_4, \end{cases} \quad (16)$$

где $f = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$ – вектор отказа.

После нахождения производных компонент вектора измерений (16), подстановки полученных результатов в компоненты вектора состояний (15) и разрешения исходного выражения относительно Y_i и \dot{Y}_i , $i = \overline{1, 2}$, получим:

$$\begin{cases} Y_1 = X_1 + f_3; \\ Y_2 = X_2 + f_4; \\ \dot{Y}_1 = X_2 + \dot{f}_3; \\ \dot{Y}_2 = -a_2 X_1 - a_1 X_2 + U + \dot{f}_3 + \dot{f}_4. \end{cases} \quad (17)$$

Выражения (17) при отсутствии отказа могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} Y_{10} = X_1; \\ Y_{20} = X_2; \\ \dot{Y}_{10} = \dot{X}_2; \\ \dot{Y}_{20} = -a_2 X_1 - a_1 X_2 + U + \dot{f}_3 + \dot{f}_4. \end{cases} \quad (18)$$

Тогда составляющие вектора отказа могут быть вычислены как

$$\Delta Y = \begin{pmatrix} Y_1 - Y_{10} \\ Y_2 - Y_{20} \\ \dot{Y}_1 - \dot{Y}_{10} \\ \dot{Y}_2 - \dot{Y}_{20} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_3 \\ f_4 \\ \dot{f}_3 \\ \dot{f}_2 + \dot{f}_4 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

С другой стороны, учитывая наличие измерителей (датчика угла крена γ и датчика угловой скорости $\dot{\gamma} = \omega_X$), выражение (19) запишем так

$$\Delta Y = \begin{pmatrix} \gamma - \gamma_0 \\ \omega_X - \omega_{X0} \\ \dot{\gamma} - \dot{\gamma}_0 \\ \dot{\omega}_X - \dot{\omega}_{X0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_3 \\ f_4 \\ f_1 + \dot{f}_3 \\ f_2 + \dot{f}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \gamma \\ \Delta \omega_X \\ \Delta \dot{\gamma} \\ \Delta \dot{\omega}_X \end{pmatrix}. \quad (15)$$

На базе выражений (20) алгоритм работы блока диагностики при идентификации составляющих вектора отказа $f = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$ может быть представлен в виде (рис. 2).

Как следует из вышесказанного, составляющие вектора отказа, несущие соответствующую смысловую нагрузку (например, f_3 – полный отказ датчика угла крена, f_1 – изменение крутизны статической характеристики датчика угла крена, f_4 – полный отказ ДУС, f_2 – изменение крутизны выходной характеристики ДУС) могут быть получены при построении блоков диагностики с целью повышения отказоустойчивости как линейных, так и нелинейных систем.

Пример функционирования схемы использования блоков диагностики с целью повышения отказоустойчивости в системе управления самолетом при посадке приведен на рис. 3.

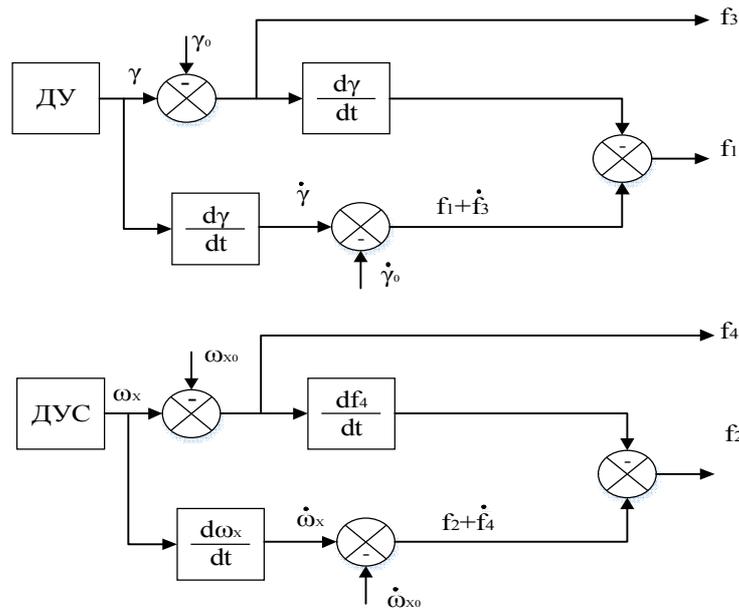


Рис. 2. Алгоритм работы блока диагностики при идентификации составляющих вектора отказа: ДУ – датчик угла; ДУС – датчик угловой скорости

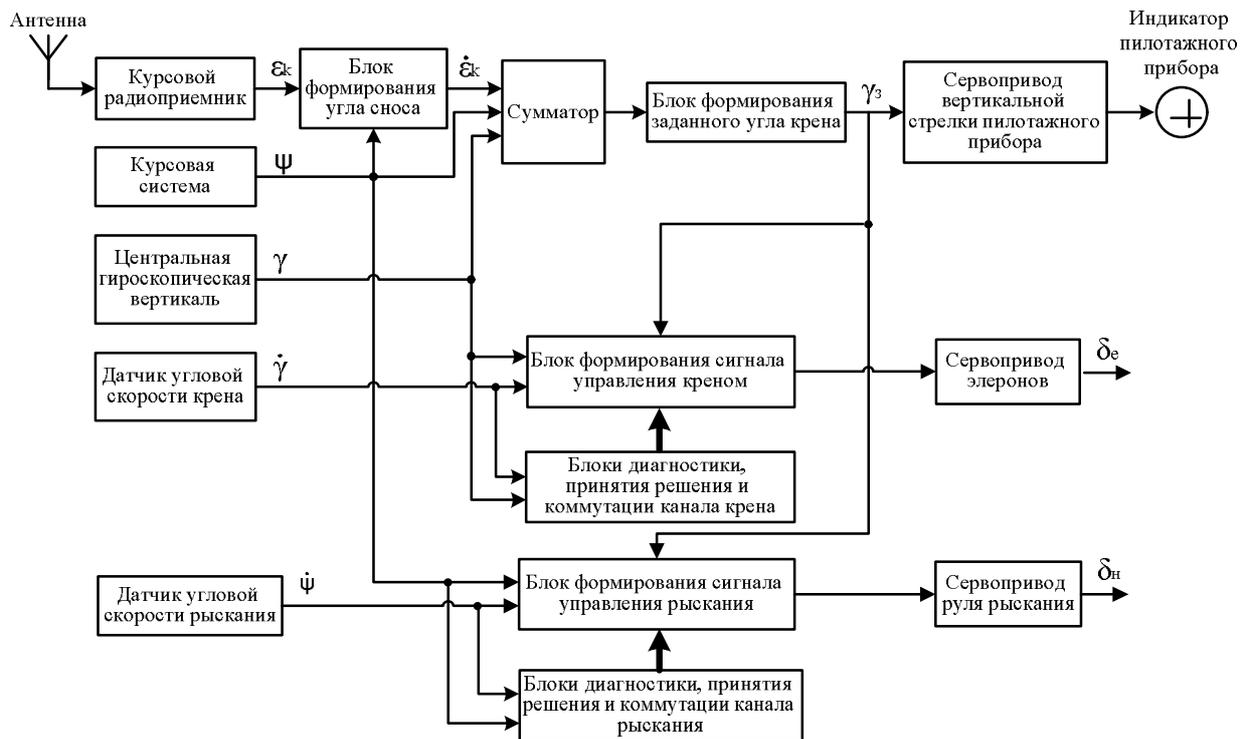


Рис. 3. Система автоматического управления самолетом при заходе на посадку с использованием блоков диагностики: ϵ_k – отклонение центра масс летательного аппарата от равносигнальной зоны курсового радиомаяка; $\dot{\epsilon}_k$ – скорость отклонения центра масс летательного аппарата от равносигнальной зоны курсового радиомаяка; γ – угол крена; $\dot{\gamma}$ – угловая скорость крена; ψ – угол рыскания; $\dot{\psi}$ – угловая скорость рыскания

В данной схеме выходные сигналы блоков диагностики канала крена и канала рыскания соответственно поступают через блоки коммутации и принятия решений об изменении алгоритмов функцио-

нирования или реконфигурации системы на блоки формирования сигналов управления каналом крена или рыскания.

Заключение

Как показывают исследования, логика проектирования блоков диагностики для обеспечения работоспособности как линейных, так и нелинейных систем может быть построена на анализе переменных вектора отказов, вводимых в состав вектора измерений. При этом полученные переменные, входящие в измененный при наличии отказов вектор состояния, позволяют разработать логику построения алгоритма работы блока диагностики исключительно без применения дополнительных аппаратных средств и сигналов тест-контроля.

Литература

1. Кулик, А. С. Становление и развитие рационального управления объектами в нештатных ситуациях [Текст] / А. С. Кулик // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2007. – №5(24). – С. 8-15.
2. Пат. 63176, Україна, МПК G05D 1/03. Відмовостійка система кутової стабілізації безпілотного літального апарата [Текст] / Симонов В. Ф., Бойко Є. А. Заявник та власник Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». - №201105097, заявл. 21.04.2011, опубл. 26.09.2011, Бюл. №18 – 3с.
3. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control* [Text] / M. Blanke, Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecks. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006. – 672 p.
4. Майоров, А. В. Выявление причин отказов, авиационного оборудования [Текст] / А. В. Майоров, С. М. Мусин, В. Ф. Янковский. – М. : Транспорт, 1996. – 286 с.

Поступила в редакцию 5.02.2014, рассмотрена на редколлегии 12.02.2014

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

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ БЛОКІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

А. М. Субота, В. Ф. Симонов, В. О. Хлівнюк

Розглядається проблема проектування відмовостійких систем керування, в структурі яких передбачається наявність блока діагностики. Для побудови алгоритмів роботи блоків діагностики як для лінійних, так і для нелінійних систем розглянуто можливість формування вектора відмов шляхом введення його компонент у відповідні складові вектора вимірювань. Оскільки в наслідок відмови одного із функціональних елементів, що входять в структуру системи, відбуваються відповідні зміни в змінних вектора стану, то отримана різниця між складовими вектора вимірювання до події відмови в одному з елементів системи та після неї дозволяє сформулювати алгоритм функціонування блока діагностики.

Ключові слова: алгоритм, вектор стану, вектор вимірювання, вектор відмов, канал крену, канал ристання, блоки діагностики.

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM'S OPERATION OF THE DIAGNOSIS BLOCKS FOR MODERN TECHNICAL CONTROL SYSTEMS

A. M. Subota, V. F. Symonov, V. A. Khlivnyuk

The problem of design fault-tolerant control systems in the structure, of which presence of diagnosis block is stipulated is considered. To construct algorithm's operation of the diagnosis blocks both for linear and for nonlinear systems opportunity of forming vector of faults by inserting its components to corresponding parts of measuring vector is considered. As on account of fault of one functional element of the system corresponding changes occur in the components of state vector, obtained difference between components of measuring vector before fault of one element of the system and after it allows to form the algorithm's operation of the diagnosis block.

Keywords: algorithm, state vector, measuring vector, faults vector, roll channel, yaw channel, diagnosis blocks.

Суббота Анатолий Максимович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.

Симонов Владимир Федорович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.

Хлівнюк Ванда Александровна – магистр кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, e-mail: Nlivanuk_vanda@ukr.net.