

УДК 681.5.09

**С.Н. ФИРСОВ, И.В. БЫЧКОВА, А.Н. ТАРАН***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

Рассмотрен подход к разработке новых типов диагностических моделей RML-моделей, позволяющих диагностировать техническое состояние САУ ЛА при наличии не измеряемых внешних возмущений в динамическом режиме. Разработанная диагностическая RML-модель для системы позволяет достоверно определять техническое состояние САУ ЛА находящегося в вынужденном движении. Полученная модель расширяет возможности сигнально-параметрического подхода и позволяет на более ранних этапах определять отклонения параметров функциональных элементов.

**отказоустойчивая система, диагностические модели, робастные диагностические модели, летательный аппарат, наблюдатели состояния, переменные состояния**

**Введение**

В последнее время, наряду с тестовыми методами определения технического состояния систем автоматического управления (САУ) летательными аппаратами (ЛА), более широкое применение получают функциональные методы – техническое состояние САУ ЛА определяется в процессе непосредственного функционирования системы без использования специальных режимов работы или тестов, что приводит к появлению ошибок первого и второго рода, т.е. фиксируется отказ в САУ ЛА при ее работоспособном состоянии, и отсутствие отказа при его наличии в системе [1].

Подобные ситуации встречаются в процессе функционального диагностирования систем управления динамическими объектами, к которым относятся ЛА, функциональные системы которых подвержены появлению отказов и влиянию внешней среды [2]. Для решения задачи диагностирования технического состояния САУ ЛА применяется сигнально-параметрический подход [3]. Суть этого подхода заключается в том, что задача определения технического состояния разбивается на четыре взаимосвязанные подзадачи: обнаружение отказа, поиск места отказа, установление класса отказа и

определение вида отказа. Для каждой задачи диагностирования строятся диагностические модели (ДМ), представляющие собой особый класс математических моделей, которые связывают прямые и косвенные признаки отказов. Полученные ДМ объединяются в иерархию ДМ, причем на нижнем уровне иерархии находятся ДМ определения видов отказа, а на верхнем – ДМ обнаружения отказа.

Сигнально-параметрический подход достаточно апробирован на различных объектах при их свободном движении (случаи параметрического возмущения) [4 – 5]. Также рассмотрены случаи применения подхода при вынужденном движении САУ ЛА, для случая когда возмущение представимо в виде некоторой аналитической зависимости и при наличии возможности применения расширенного наблюдателя состояния [6 – 7]. Однако на данный момент времени недостаточно полно рассматривалась возможность применения сигнально-параметрического подхода для систем, подверженных внешним неконтролируемым возмущениям.

**Постановка задачи.** Так как в большинстве случаев диагностическое обеспечение реализуется на микропроцессорной технике, то будем рассматривать дискретную систему управления, которая представлена следующей математической моделью:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(\alpha)x(k) + B(\alpha)u(k) + f(k); \\ y(k) = C(\alpha)x(k); \\ x(0) = x_0, k \geq 0, |u(k)| \leq u_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x(k) \in R^n$  – вектор состояния системы;  $u(k) \in R^m$ ,  $y(k) \in R^l$  – вектор управления и вектор измерения (выхода);  $A(\alpha)$ ,  $B(\alpha)$ ,  $C(\alpha)$  – матрицы состояния, управления и выхода соответственно;  $f(k)$  – внешнее возмущение;  $\alpha$  – параметр отказа.

Рассматриваемая система (1) подвержена воздействию внешних возмущений  $f(k)$ . Считается, что при работе системы доступны измерению процессы  $u(k)$  и  $y(k)$ , а  $x(k)$  и  $f(k)$  – недоступны. Рассматривается задача получения ДМ обнаружения отказа в системе (1).

Выбор типа ДМ зависит от вида решаемой задачи и ограничений, накладываемых на временные, количественные и качественные характеристики процесса диагностирования. Для рассматриваемой системы (1) предпочтительнее использовать ДМ с произвольной динамикой – ML-модель [8]. Особенность использования ML-модели заключается в том, что для воспроизведения номинального функционирования системы (1) используется наблюдатель состояния – наблюдатель Люенбергера:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)); \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k), \quad x(0) = x_0; \\ k \geq k, |u(k)| \leq u_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\hat{x}(k) \in R^n$  – вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния системы;  $\hat{y}(k) \in R^l$  – вектор выхода;  $L(t)$  –  $n \times l$  матрица коэффициентов обратной связи по невязке между выходами системы и наблюдателя.

Для исследования работы ML-модели рассмотрим ошибку оценивания  $\varepsilon(k) = (x(k) - \hat{x}(k))$ , которая является косвенным признаком возникновения отказа в системе (если выполняется условие  $\varepsilon(t) \leq \delta_0$ , то в системе нет отказа, в противном слу-

чае в системе имеет место отказ, где  $\delta_0$  – признак возникновения отказа) для случая измерения параметров без шумов:

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= (A(\alpha) - LC(\alpha))x(k) - (A - LC)\hat{x}(k) + \\ &+ (B(\alpha) - B)u(k) + f(k); \\ \varepsilon(0) &= \varepsilon_0 = x_0 - \hat{x}_0, k \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3), источниками отклонения  $\varepsilon(t)$  являются начальное рассогласование  $\varepsilon_0 = x_0 - \hat{x}_0$ , параметрическое возмущение (изменение параметров матриц  $A(\alpha)$ ,  $B(\alpha)$ ,  $C(\alpha)$ ), внешнее возмущение.

Таким образом, классические ДМ не в состоянии дать достоверную информацию о техническом состоянии объекта диагностирования. Поэтому необходимо разработать ДМ чувствительные к изменению параметров системы и робастные к внешним неконтролируемым возмущениям.

### Диагностические модели, не чувствительные к внешним возмущениям

На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема реализации ML-модели для задачи обнаружения отказа в исследуемой системе. Предположим, что справедлива следующая гипотеза: за время диагностирования системы в ней не возникают отказы. Для устранения влияния системы диагностирования на динамические свойства САУ ЛА формируем ограничения на время диагностирования:

$$t_{mn} \leq t_d + t_e, \quad (4)$$

где  $t_{mn}$  – время переходного процесса объекта диагностирования;  $t_d$  – время, затрачиваемое на диагностирование САУ ЛА;  $t_e$  – время, затрачиваемое на восстановление объекта диагностирования.

Для случая кратных отказов в условие (4) необходимо ввести параметр кратности отказов:

$$t_{mn} \leq (t_d + t_e) / n, \quad (5)$$

где  $n$  – кратность отказов.

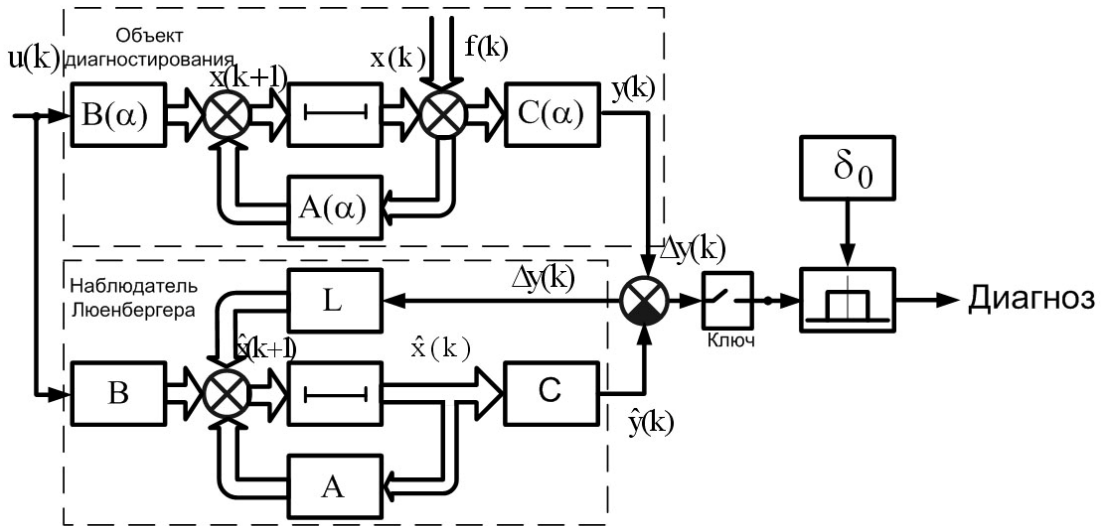


Рис. 1. Структурно-функциональная схема обнаружения отказа с использованием ML-модели

Анализ уравнения (3) показал, что отклонение выхода объекта диагностирования от номинального поведения (выхода наблюдателя Льюенбергера) возникает как из-за изменения параметров САУ ЛА, так и из-за наличия внешних не контролируемых возмущений.

Рассмотрим уравнение (3) в  $(k+1)$ -й момент времени:

$$\begin{aligned} \varepsilon(k+1) = & (A(\alpha) - LC(\alpha))x(k+1) - \\ & -(A - LC)\hat{x}(k+1) + \\ & +(B(\alpha) - B)u(k+1) + f(k+1). \end{aligned} \quad (6)$$

Так как на время диагностирования наложены ограничения (4) – (5), то справедливо тождество:

$$\begin{aligned} f(k) \approx f(k+1) \approx f(k+2) \approx \dots \approx f(k+N), \\ \forall T_0(k+N) \in [0, t_0]. \end{aligned} \quad (7)$$

Вычтем из уравнения (6) уравнение (3), учитывая гипотезу (7):

$$\begin{aligned} E(k+1) = \varepsilon(k+1) - \varepsilon(k) = & (A(\alpha) - LC(\alpha)) \times \\ & \times (x(k+1) - x(k)) + (A - LC)(\hat{x}(k) - \hat{x}(k+1)) + \\ & +(B(\alpha) - B)(U(k+1) - U(k)); \\ E(0) = & E_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Предположим, что в системе (3) возникают отказы, для которых справедливо неравенство:

$$\Delta\lambda_i \gg \Delta\lambda_i^2. \quad (9)$$

Если условие (9) выполняется, то в системе управления (3) возник малый отказ, если нет –

большой. При возникновении малых отказов, что имеет место в реальных системах для множества видов отказов, связанных с дрейфами, износом, старением, матрицы уравнений возмущенного движения (8) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} A(\lambda) &= A + A_i \Delta\lambda_i; \\ B(\lambda) &= B + B_i \Delta\lambda_i; \\ C(\lambda) &= C + C_i \Delta\lambda_i, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $A_i = \frac{\partial A}{\partial \lambda_i}$ ,  $B_i = \frac{\partial B}{\partial \lambda_i}$ ,  $C_i = \frac{\partial C}{\partial \lambda_i}$  – производные матриц состояния, управления и выхода по  $i$ -му классу отказа;  $\Delta\lambda_i$  – величина изменения  $i$ -го класса отказа;  $A, B, C$  – номинальные значения матриц (при условии отсутствия отказов в системе) состояния, управления и выхода.

Подстановкой матриц (10) в систему (8) получено:

$$\begin{aligned} E(k+1) = & (A - LC)(\Delta x(k) - \Delta \hat{x}(k)) + \\ & +(A_i - LC_i)\Delta x(k)\Delta\alpha + B_i\Delta U(k)\Delta\alpha, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Delta x(k) = x(k+1) - x(k)$ ;

$$\Delta \hat{x}(k) = \hat{x}(k+1) - \hat{x}(k); \Delta U(k) = U(k+1) - U(k).$$

Система уравнений (11) представляет собой новый класс диагностических моделей, состояние которой определяется только параметрами системы (1) и задающими воздействиями.

Таким образом, получен новый класс ДМ ро-

бастных к внешним неконтролируемым возмущениям – RML-модели.

Полученная RML-модель позволяет диагностировать техническое состояние САУ ЛА, находящейся

под влиянием внешних неконтролируемых возмущений.

Эквивалентная структурно-функциональная схема RML-модели представлена на рис. 2.

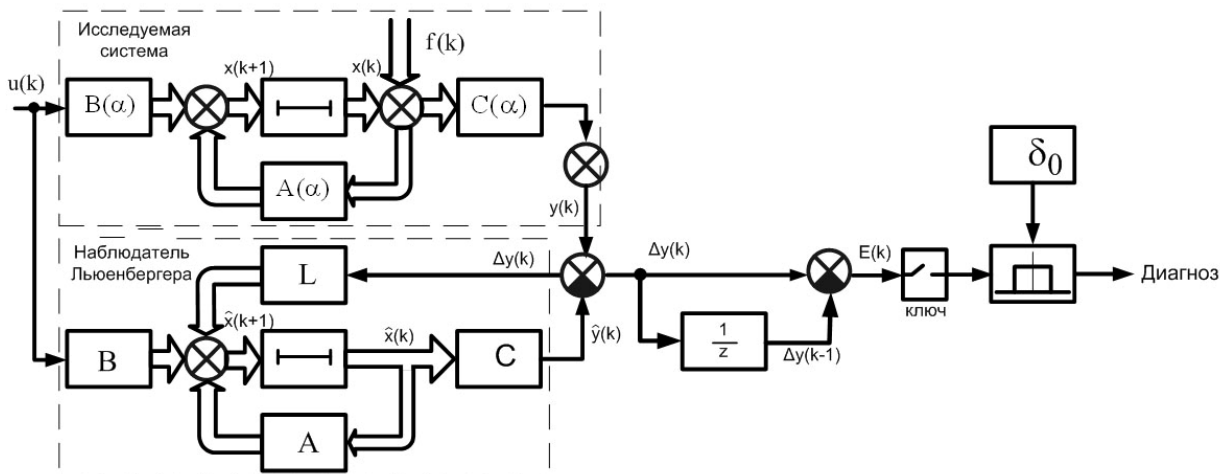


Рис. 2. Структурно-функциональная схема обнаружения отказа в системе с применением RML-модели

### Выводы

Разработанная диагностическая RML-модель позволяет достоверно определять техническое состояние систем автоматического управления летательными аппаратами, находящейся в вынужденном движении.

Полученная модель расширяет возможности сигнально-параметрического подхода и позволяет на более ранних этапах определять отклонения параметров функциональных элементов.

### Литература

1. Ефанов В.Н., Суяргулов Т.Р. Параметрический синтез отказоустойчивых алгоритмов управления в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2000. – №2. – С. 118-135.
2. Кулик А.С. Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2000. – Вып. 15. – С. 18-31.
3. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

4. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления. – Х.: ХАИ, 1991. – 91 с.
5. Разинькова Н.П. Обеспечение отказоустойчивости гироскопических измерителей угловых положений беспилотных самолетов: Дис...канд. техн. наук: 05.13.06. – Х., 1998. – 140 с.
6. Гавриленко О.И. Обеспечение активной отказоустойчивости систем управления статически неустойчивого динамического объекта: Дис...канд. техн. наук: 05.13.03. – Х., 2003. – 157 с.
7. Фирсов С.Н. Обеспечение активной отказоустойчивости пневматического сервопривода беспилотного летательного аппарата: Дис...канд. техн. наук: 05.13.03. – Х., 2005. – 201 с.
8. Кулик А.С., Нарожный ВВ., Фирсов С.Н., Бычкова И.В. Диагностирование технического состояния САУ БПЛА при наличии детерминированных возмущений // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – Вып. 1 (13). – С. 75-78.

Поступила в редакцию 13.07.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.