

УДК 681.5.09

С.Н. ФИРСОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНИХ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Представлен подход к разработке новых типов диагностических моделей RML-моделей, позволяющих диагностировать техническое состояние САУ ЛА при наличии неизмеряемых внешних возмущений.

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

Введение

Во множестве случаев получить адекватные результаты при решении задач управления динамическими объектами позволяют традиционные методы управления [1]. Тем не менее, остается широкий класс решаемых задач, которые не могут быть решены только на основе использования традиционных методов современной теории управления. Подобные ситуации встречаются при управлении динамическими объектами, к которым относятся летательные аппараты, функциональные системы которых подвержены появлению отказов и влиянию внешней среды [2]. Данное обстоятельство определяет широкий интерес специалистов к разработке функциональных систем, к которым относятся и системы автоматического управления (САУ) летательными аппаратами, устойчивых к отказам и называемых отказоустойчивыми САУ ЛА [3].

В настоящее время в создании отказоустойчивых САУ ЛА накоплен определенный опыт, но существующие структурные и параметрические подходы к обеспечению отказоустойчивости САУ ЛА не используют системные принципы самоорганизации и комплексно не применяют арсенал различных средств для сохранения работоспособности САУ ЛА при возникновении отказов в ее функциональных элементах. Указанных недостатков лишен систем-

ный подход к обеспечению отказоустойчивости САУ ЛА, особенность которого заключается в том, что он интегрирует две взаимосвязанные задачи: задачу глубокого диагностирования технического состояния САУ ЛА и задачу гибкого восстановления ее работоспособности.

Для решения задачи диагностирования технического состояния САУ ЛА применяется сигнально-параметрический подход. 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 не рассматривалась возможность применения сигнально-параметрического подхода для систем, подверженных внешним неконтролируемым возмущениям.

Постановка задачи. Рассмотрим систему управления, которая представлена следующей математической моделью:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\alpha)x(t) + B(\alpha)u(t) + f(t); \\ y(t) = C(\alpha)x(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \geq t_0, \quad |u(t)| \leq u_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

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

Рассматриваемая система (1) подвержена воздействию внешних возмущений $f(t)$. Считается, что при работе системы доступны измерению процессы $u(t)$ и $y(t)$, а $x(t)$ и $f(t)$ – 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 – МЛ-модель [8]. Особенность использования МЛ-модели заключается в том, что для воспроизведения номинального функционирования системы (1) используется наблюдатель состояния – наблюдатель Люенбергера:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \geq t_0, \quad |u(t)| \leq u_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ – вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния системы; $\hat{y}(t) \in R^l$ – век-

тор выхода; $L(t)$ – $n \times l$ матрица коэффициентов обратной связи по невязке между выходами системы и наблюдателя.

Для исследования работы МЛ-модели рассмотрим ошибку оценивания $\varepsilon(t) = (x(t) - \hat{x}(t))$, которая является косвенным признаком возникновения отказа в системе (если выполняется условие $\varepsilon(t) \leq \delta_0$, то в системе нет отказа, в противном случае в системе имеет место отказ, где δ_0 – признак возникновения отказа) для случая измерения параметров без шумов:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= (A(\alpha) - LC(\alpha))x(t) - (A - LC)\hat{x}(t) + \\ &+ (B(\alpha) - B)u(t) + f(t), \quad (3) \\ \varepsilon(t_0) &= \varepsilon_0 = x_0 - \hat{x}_0, \quad t \geq t_0. \end{aligned}$$

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.

Анализ уравнения (3) показывает, что рассогласование $\varepsilon(t)$ возникает не только из-за отклонения параметров системы, но и из-за влияния внешних неконтролируемых возмущений $f(t)$. Отсутствие учета этих факторов приводит к возникновению ошибок первого и второго рода: сигнализация системой диагностирования технического состояния отказа при его отсутствии и обратный процесс. Следовательно, необходимо разработать новый тип ДМ, робастных к внешним возмущениям и чувствительных к изменениям параметров системы управления.

Диагностические модели, робастные к внешним возмущениям

Рассматриваем систему, представленную системой уравнений (1). На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема реализации МЛ-модели для задачи обнаружения отказа в исследуемой системе.

Представим исследуемую систему (1) следующей математической моделью:

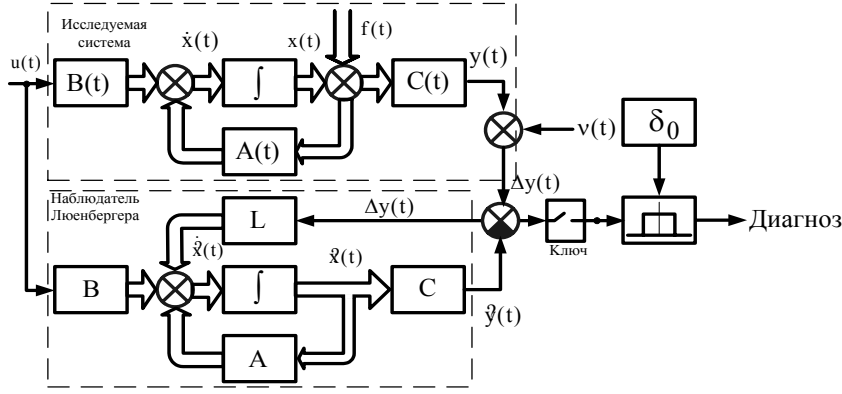


Рис. 1. Структурно-функциональная схема обнаружения отказа с использованием ML-модели

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = A(\alpha)z(t) + B'y(t) + f(t); \\ u(t) = C'z(t), z(t_0) = z_0, t \geq t_0, |y(t)| \leq y_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

где $z(t) \in R^n$ – вектор состояния системы; $z(t) \in R^n$ – вектор измерения; $y(t) \in R^l$ – вектор управления; $A(\alpha)$, $B(\alpha)$, $C(\alpha)$ – матрицы состояния, управления и выхода соответственно.

Для системы (4) наблюдатель Льюенбергера будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = A\hat{z}(t) + B'y(t) + L(u(t) - \hat{u}(t)); \\ \hat{u}(t) = C'\hat{z}(t), z(t_0) = z_0, t \geq t_0, |y(t)| \leq y_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\hat{z}(t) \in R^n$ – вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния системы; $\hat{u}(t) \in R^l$ – вектор выхода; $L(t)$ – $n \times l$ матрица коэффициентов обратной связи по невязке между выходами системы и наблюдателя. Ошибка оценивания наблюдателем (5) определяется так же, как и для наблюдателя (2):

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= (A(\alpha) - LC')z(t) - (A - LC')\hat{z}(t) + f(t), \\ \xi(t_0) &= \xi_0 = z_0 - \hat{z}_0, t \geq t_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Вычтем из уравнения (3) уравнение (6):

$$\dot{\Delta}(t) = A(\alpha)(x(t) - z(t)) - L\Delta(t) - A(\hat{x}(t) - \hat{z}(t)) + (B(\alpha) - B)u(t), \quad (7)$$

$$\Delta(t_0) = \Delta_0 = \varepsilon_0 - \xi_0, t \geq t_0.$$

Для случая номинального функционирования, т.е. когда $A(\alpha) = A$, $B(\alpha) = B$ и $C(\alpha) = C$, уравнение (7) записывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}(t) &= (A - LC)\Delta(t), \\ \Delta\varepsilon(t_0) &= \Delta\varepsilon_0 = \varepsilon_0 - \xi_0, t \geq t_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, на динамику изменения погрешности (8) не влияют внешние неконтролируемые возмущения, а она определяется только параметрами системы (1). Полученное соотношение позволяет разрабатывать новый класс ДМ, робастных к внешним неконтролируемым возмущениям – RML-модели.

Для случая «малых» отказов справедливы равенства: $A(\alpha) = A + \Delta A$; $B(\alpha) = B + \Delta B$; $C(\alpha) = C + \Delta C$,

тогда RML-модель будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\Delta}(t) = G(\Delta x(t) - \Delta z(t)) + A_i(\hat{x}(t) - \hat{z}(t))\Delta\alpha_i + \\ + B_i u(t)\Delta\alpha_i; \\ \delta(t) = C\Delta x(t) + C_i \hat{x}(t)\Delta\alpha_i + C'\Delta z(t), \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta(t_0) = \Delta_0 = \varepsilon_0 - \xi_0, t \geq t_0,$$

где $A_i = \frac{\partial A}{\partial \lambda_i}$, $B_i = \frac{\partial B}{\partial \lambda_i}$, $C_i = \frac{\partial C}{\partial \lambda_i}$ – частные производные матриц состояния, управления и выхода соответственно по обобщенному диагностическому параметру $\lambda_i = \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$; $G = \sigma I$ – матрица, собственные числа которой определяют динамику RML-модели; $\delta(t)$ – выход 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.

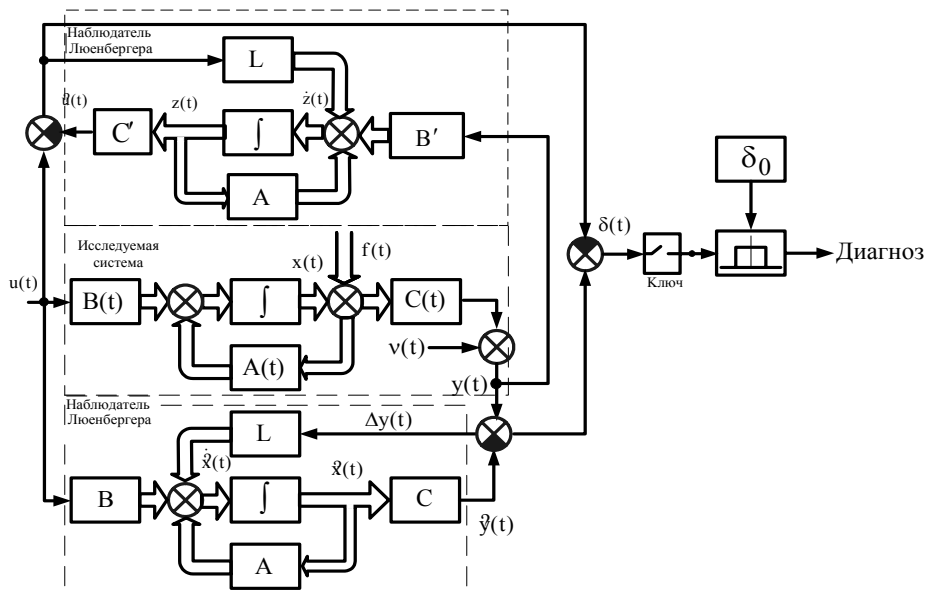


Рис. 2. Структурно-функциональная схема обнаружения отказа в системе с применением RML-модели

Выводы

Разработанная диагностическая RML-модель позволяет получать достоверно определять техническое состояние САУ ЛА 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. университет, 2000. – Вып. 15. – С. 18-31.
3. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления. – Х.: ХАИ, 1991. – 91с.
4. Разинькова Н.П. Обеспечение отказоустойчивости гироскопических измерителей угловых поло-

жений беспилотных самолетов: Дис...канд. техн. наук: 05.13.06. – Х., 1998. – 140 с.

5. Гавриленко О.И. Обеспечение активной отказоустойчивостью систем управления статически неустойчивого динамического объекта: Дис...канд. техн. наук: 05.13.03. – Х., 2003. – 157 с.

6. Фирсов С.Н. Обеспечение активной отказоустойчивостью Пневматического сервопривода беспилотного летательного аппарата: Дис...канд. техн. наук: 05.13.03. – Х., 2005. – 201 с.

7. Кулик А.С., Нарожный В.В., Фирсов С.Н., Бычкова И.В. Диагностирование технического состояния САУ БПЛА при наличии детерминированных возмущений // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 1 (13). – С. 75-78.

8. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

Поступила в редакцию 1.11.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.М. Любчик, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.