

УДК 681.5.09

А.С. КУЛИК, С.Н. ФИРСОВ, О.В. РЕЗНИКОВА

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

ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕННОГО ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В данной статье рассматривается принцип синтеза системы диагностирования с учетом действия на объект управления ограниченного возмущающего воздействия. Показано, что при применении в структуре системы управления итерационно-инверсного фильтра обеспечивается инвариантность системы управления к возмущениям, что позволяет применять сигнально-параметрический подход для построения диагностических моделей. Рассмотрена схема формирования косвенных диагностических признаков на основе итерационно-инверсного фильтра, позволяющая различать действие на объект управления внешних возмущений от действия изменения параметров объекта. На примере объекта управления в виде инерционного звена получены динамические характеристики системы диагностирования с итерационно-инверсным фильтром.

Ключевые слова: диагностирование, итерационно-инверсный фильтр, сигнально-параметрический подход.

Введение

Развитие авиации и космонавтики, других критических отраслей невозможно без постоянного и комплексного совершенствования архитектур и технических характеристик систем управления (СУ), технологий их разработки, испытаний и применения. При этом разработчики СУ сталкиваются с рядом трудностей, связанных с учетом действующих на СУ различных возмущающих воздействий, а также отказов функциональных элементов СУ. Одной из наиболее важных задач в данном контексте, следует выделить построение СУ с компенсацией возмущений. С другой стороны, в последнее время уделяется много внимания задаче построения систем диагностирования функционального состояния СУ. Однако при построении таких систем возмущения либо не учитываются, либо задаются определенной приближенной моделью, что не позволяет охватить весь диапазон действующих возмущений [1], что приводит к ложному срабатыванию системы диагностирования при отсутствии отказов. Поэтому актуальной является задача построения системы диагностирования СУ с возможностью различения возмущений действующих на СУ от отказов функциональных блоков СУ.

1. Выбор методов решения поставленной задачи

В настоящее время разработано много методов и подходов к решению задачи компенсации возмущений. Один подход подразумевает получение оце-

нок действующих возмущений, а затем их компенсацию. Однако при таком подходе необходимо наличие априорной информации о параметрах возмущений.

Другой подход подразумевает построение системы управления инвариантной к возмущениям. Впервые на возможность построения такой системы было указано в работах Г.В. Щипанова. Развитие теории инвариантности связано с именами Н.Н. Лузина, В.С. Кулебякина, П.И. Кузнецова, Б.Н. Петрова и других. При этом одними из трудностей реализации условий инвариантности была необходимость применения компенсационных связей с передаточной функцией обратной относительно объекта управления. При применении непрерывных вычислительных устройств реализация условий инвариантности оказалась недостижимой.

В качестве решения данной задачи было предложено операцию обращения передаточной функции представить рядом Неймана или итерационной инверсией, что позволяет достичь некоторого приближения к обратной функции.

Таким образом, инвариантность системы к возмущениям обеспечивается путем использования компенсационного контура, который формирует дополнительный ограниченный сигнал управления, на основе восстановленного с помощью итерационно-инверсного фильтра эквивалентного возмущения, действующего на объект [2].

Ограничение применения данного подхода связано с невозможностью компенсации изменения параметров функциональных блоков объекта управления (отказов). Однако отказ любого элемента СУ

представляет собой неопределенное событие с точки зрения его появления, места возникновения, принадлежности к одному из классов, конкретного вида проявления. Поэтому компенсация отказов невозможна без снятия этих неопределенностей. Для этой цели возможно применять сигнально-параметрический подход к диагностированию технических систем [3].

2. Разработка схем формирования косвенных диагностических признаков

Для решения задач диагностирования на основании обработки входных и выходных сигналов СУ необходимо сформировать соответствующие диагностические модели, отображающие влияние прямых диагностических признаков на косвенные диагностические признаки. В качестве косвенных диагностических признаков обычно используются признаки, сформированные на основании доступных измерению входных и выходных сигналов СУ и оценочных значений выходных сигналов, получен-

ных из эталонной модели. Связь прямых и косвенных диагностических признаков описывается моделью, полученной в результате вычитания выходных сигналов рассматриваемой СУ и ее эталонной модели.

Рассмотрим СУ с компенсационным контуром в контексте задачи построения системы диагностирования. Модель системы диагностирования представлена на рис. 1.

Для такой системы передаточные функции (ПФ) наблюдателя и итерационно-инверсного фильтра выбираются равными ПФ реальной системы для этих компонентов, а передаточная функция эталонного поведения объекта управления выбирается исходя из параметров, полученных при идентификации.

Рассмотрим уравнения движения для такой системы в номинальном режиме работы:

$$Y_3(s) \cdot (1 + W_1(s)W_{o3}(s) - W_1(s)W_{o3}(s)W_e^{\hat{y}/y}(s) - W_e^{\hat{y}/u}(s)W_1(s) + W_{o3}(s)) = W_{o3}(s) \cdot U(s); \quad (1)$$

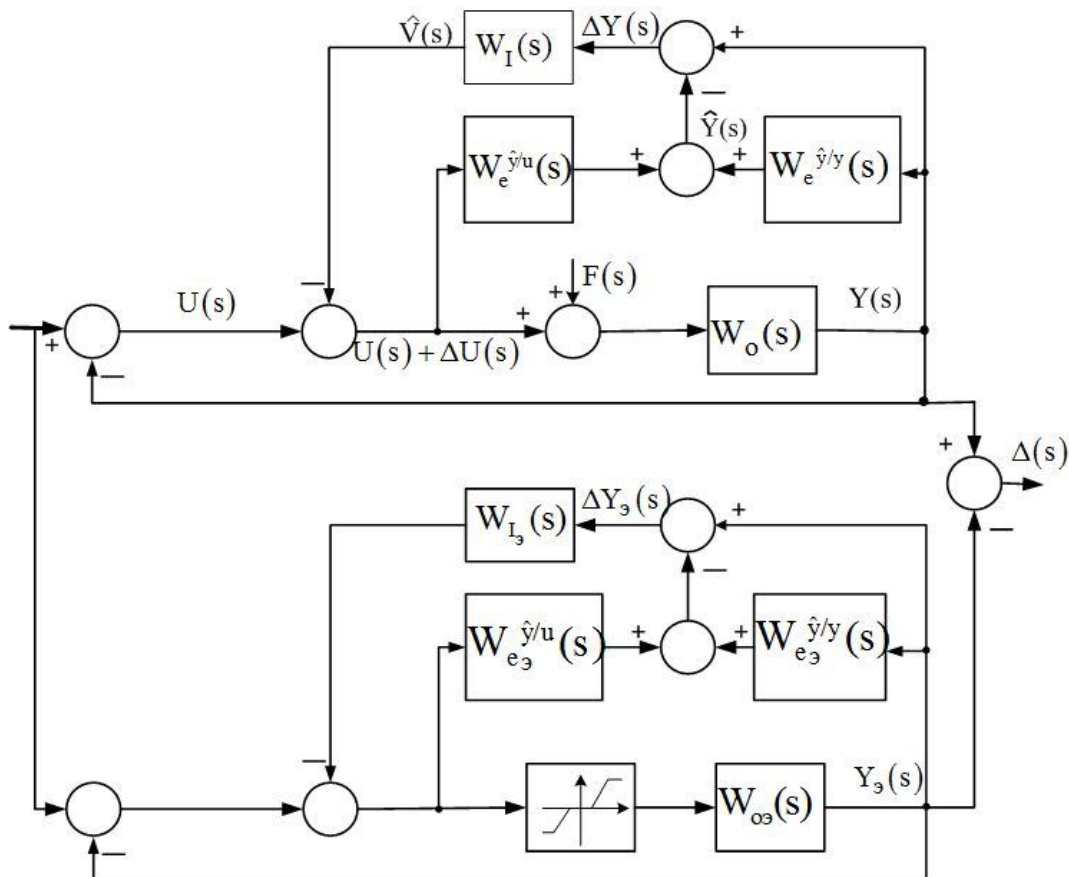


Рис. 1. Модель системы диагностирования с итерационно-инверсным фильтром:

$W_o(s)$ – передаточная функция (ПФ) объекта управления; $W_e^{\hat{y}/u}(s)$, $W_e^{\hat{y}/y}(s)$ – ПФ наблюдателя по состоянию и выходу соответственно, $W_1(s)$ – ПФ итерационно-инверсного фильтра; $W_{o3}(s)$ – ПФ эталонного поведения объекта управления; $U(s)$, $F(s)$, $Y(s)$ – s -преобразования сигналов: управления, эквивалентного возмущения и реального выхода соответственно

в возмущенном режиме работы:

$$\begin{aligned} & \tilde{Y}(s) \cdot (1 + W_1(s)\tilde{W}_0(s) - W_1(s)\tilde{W}_0(s)W_e^{\hat{y}/y}(s) - \\ & - W_e^{\hat{y}/u}(s)W_1(s) + \tilde{W}_0(s)) = \tilde{W}_0(s) \cdot U(s) + \\ & + (1 - W_e^{\hat{y}/u}(s)W_1(s))\tilde{W}_0(s) \cdot F(s). \end{aligned} \quad (2)$$

Разница выходных сигналов в этом случае будет вычисляться следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= \tilde{Y}(s) - Y_3(s) = \Delta Y(s) * \\ & * (1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)) + (\tilde{Y}(s)\tilde{W}_0(s) - \\ & - Y_3(s)W_{03}(s)) \cdot (1 + W_1(s) - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s)) = \\ & = U(s) \cdot \Delta W_0(s) + F(s) \cdot \tilde{W}_0(s)(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)). \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразуем данное выражение в соответствии с правилами:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(s) &= Y_3(s) + \Delta Y(s); \\ \tilde{W}_0(s) &= W_{03}(s) + \Delta W_0(s). \end{aligned} \quad (4)$$

После преобразования получим уравнение, описывающее динамику данной системы:

$$\begin{aligned} \Delta Y(s)(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s) + W_{03}(s)(1 + W_1(s) - \\ - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s))) + \Delta Y(s)\Delta W_0(s)(1 + W_1(s) - \\ - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s)) + Y_3(s)\Delta W_0(s)(1 + W_1(s) - \\ - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s)) = U(s) \cdot \Delta W_0(s) + \\ + F(s) \cdot (W_{03}(s) + \Delta W_0(s))(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)). \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим выражение, стоящее при переменной $F(s)$. Его можно разложить на две составляющие:

$$\begin{aligned} & W_{03}(s)(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)) + \\ & + \Delta W_0(s)(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)). \end{aligned} \quad (6)$$

Величина $\Delta W_0(s)$ является малой и выражение $1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)$, в соответствии с условием, величина, стремящаяся к нулю. Таким образом, получаем, что вторая составляющая выражения имеет второй порядок малости и ей можно пренебречь. Поэтому уравнение динамики преобразуем к следующему виду:

$$\begin{aligned} \Delta Y(s)(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s) + W_{03}(s)(1 + W_1(s) - \\ - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s))) + \Delta Y(s)\Delta W_0(s)(1 + W_1(s) - \\ - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s)) + Y_3(s)\Delta W_0(s)(1 + W_1(s) - \\ - W_1(s)W_e^{\hat{y}/y}(s)) = U(s) \cdot \Delta W_0(s) + \\ + F(s) \cdot W_{03}(s)(1 - W_1(s)W_e^{\hat{y}/u}(s)). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, получена диагностическая модель СУ, в которой разделено влияние отказов (изменение $\Delta W_0(s)$) и возмущений $F(s)$.

При применении такой системы для диагностирования изменения параметров объекта управления достигается максимальная точность при одновременной компенсации действующих внешних возмущений.

3. Исследование системы диагностирования с итерационно-инверсным фильтром для системы стабилизации оборотов электродвигателя

Для примера рассмотрим систему диагностирования с итерационно-инверсным фильтром для системы стабилизации оборотов электродвигателя, передаточная функция объекта управления в которой представляет собой инерционное звено:

$$W_0(s) = \frac{K}{Ts + 1}. \quad (8)$$

Компенсационный контур для такого объекта состоит из:

- наблюдателя состояния по выходу, описываемого передаточной функцией:

$$W_e^{\hat{y}/y}(s) = \frac{L}{Ts + L}. \quad (9)$$

- наблюдателя состояния по управлению, описываемого передаточной функцией:

$$W_e^{\hat{y}/u}(s) = \frac{K}{Ts + L}. \quad (10)$$

- итерационно-инверсного фильтра, описываемого передаточной функцией:

$$W_1(s) = \frac{Ts + L}{K_v \cdot Ks + K}. \quad (11)$$

Рассмотрим уравнения движения для такой системы в номинальном режиме работы:

$$Y_3(s) \cdot \left(1 + \frac{Ts + L}{(K_v s + 1)(Ts + 1)} - \frac{L}{(K_v s + 1)(Ts + 1)} - \frac{1}{K_v s + 1} + \frac{K}{Ts + 1}\right) = U(s) \cdot \frac{K}{Ts + 1} \quad (12)$$

После преобразования получим:

$$Y_3(s) \cdot (K_v Ts^2 + s(K_v + T + K_v \cdot K) + K) = U(s) \cdot K(K_v s + 1); \quad (13)$$

в возмущенном режиме работы:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(s) \cdot \left(1 + \frac{\tilde{K}(Ts + L)}{K(K_v s + 1)(\tilde{T}s + 1)} - \frac{\tilde{K} \cdot L}{K(K_v s + 1)(\tilde{T}s + 1)} - \frac{1}{K_v s + 1} + \frac{\tilde{K}}{\tilde{T}s + 1}\right) = \\ = U(s) \cdot \frac{\tilde{K}}{\tilde{T}s + 1} + F(s) \cdot \frac{\tilde{K}}{\tilde{T}s + 1} \cdot \frac{K_v s}{K_v s + 1}. \end{aligned} \quad (14)$$

После преобразования получим:

$$\tilde{Y}(s) \cdot (K_v Ts^2 + s(K_v + \tilde{T} + K_v \cdot \tilde{K}) + \tilde{K}) = U(s) \cdot \tilde{K}(K_v s + 1) + F(s) \tilde{K} \cdot K_v s. \quad (15)$$

Разница выходных сигналов в этом случае будет вычисляться следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta(s) = \tilde{Y}(s) - Y_3(s) = \Delta Y(s)(K_v Ts^2 + K_v s) + \\ + \tilde{Y}(s) \left((\tilde{T} + K_v \cdot \tilde{K})s + \tilde{K} \right) - \\ - Y_3(s) \left((T + K_v \cdot K)s + K \right) = \\ = U(s) \cdot (\tilde{K} \cdot K_v s - K \cdot K_v s) + F(s) \tilde{K} \cdot K_v s. \end{aligned} \quad (16)$$

Преобразуем данное выражение в соответствии с правилами:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(s) = Y_3(s) + \Delta Y(s); \\ \tilde{T} = T + \Delta T; \\ \tilde{K} = K + \Delta K. \end{aligned} \quad (17)$$

После преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \Delta Y(s)(K_v Ts^2 + (T + K_v \cdot K + K_v)s + K) + \\ + \Delta Y(s) \left((\Delta T + K_v \cdot \Delta K)s + \Delta K \right) + \\ + Y_3(s) \left((\Delta T + K_v \cdot \Delta K)s + \Delta K \right) = \\ = U(s) \cdot \Delta K \cdot K_v s + F(s)(K + \Delta K) \cdot K_v s. \end{aligned} \quad (18)$$

Данная модель представляет собой динамическую диагностическую модель СУ и позволяет осуществлять обнаружение отказа, поиск места и установление класса отказа с использованием критериев

структурной и сигнальной диагностируемости сигнально-параметрического подхода [3].

С помощью пакета Matlab проведено моделирование динамики полученной системы. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1
Динамические характеристики системы

Вид исследуемой системы	Δ_{\max} В	Время проявления Δ_{\max} , с	Время переходного процесса, с
При действии возмущения	0,013	0,01	0,15
При действии отказа - уменьшение К	0,043	0,02	0,15
При действии возмущения и отказа - уменьшение К	0,056	0,02	0,15
При действии отказа - увеличение Т	0,14	0,02	0,09
При действии возмущения и отказа - увеличение Т	0,15	0,02	0,09

Заключение

В результате проведенных исследований получены диагностические модели СУ, позволяющие различать влияние отказов и возмущений. Синтез такого рода диагностических моделей возможен благодаря применению в контуре управления итерационно-инверсного фильтра, представленного в виде разложенной, в ряд Неймана, обратной относительно объекта управления ПФ.

Рассмотрен пример системы диагностирования с итерационно-инверсным фильтром для системы стабилизации оборотов электродвигателя, передаточная функция объекта управления в которой представляет собой инерционное звено, получена динамическая диагностическая модель системы диагностирования с итерационно-инверсным фильтром, а также динамические характеристики такой системы.

Анализ полученных данных позволяет выбирать время, а также величину порога срабатывания системы диагностирования, исключая влияние ограниченных возмущений.

Литература

1. Кулик, А.С. Диагностирование функционального состояния электромаховичной системы ориентации углового положения микроспутника [Текст] / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, А.Н. Таран // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 4 (45). – С. 82-90.

2. Кортунув, В.И. Итерационно-инверсные динамические модели в пространстве состояния для

задач робастного наблюдения и управления [Текст] / В.И. Кортунув, И.Ю. Дыбская // Обчислювальна техніка та автоматизація: наук. праці Донецького нац. техн. ун-ту. – 2002. – №47. – С. 87-95.

3. Кулик, А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А.С. Кулик. – Х.: Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

Поступила в редакцию 04.12.2012, рассмотрена на редколлегии 12.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой Авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ПРИНЦИПИ СИНТЕЗУ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНИХ ЗБУРЮЮЧИХ ВПЛИВІВ

А.С. Кулік, С.Н. Фірсів, О.В. Резнікова

У даній статті розглядається принцип синтезу системи діагностування з урахуванням дії на об'єкт управління обмеженої збурюючої дії. Показано, що при застосуванні в структурі системи управління ітераційно-інверсного фільтра забезпечується інваріантність системи управління до збурень, що дозволяє застосовувати сигнально-параметричний підхід для побудови діагностичних моделей. Розглянуто схему формування непрямих діагностичних ознак на основі ітераційно-інверсного фільтра, що дозволяє розрізнити дію на об'єкт управління зовнішніх збурень від дії зміни параметрів об'єкта. На прикладі об'єкта управління у вигляді інерційної ланки отримані динамічні характеристики системи діагностування з ітераційно-інверсним фільтром.

Ключові слова: діагностування, ітераційно-інверсний фільтр, сигнально-параметричний підхід.

PRINCIPLES OF SYNTHESIS OF DIAGNOSTIC SYSTEMS IN LIGHT OF LIMITED DISTURBING EFFECTS

A.S. Kulik, S.N. Firsov, O.V. Reznikova

This article discusses the principle of synthesis diagnostic system taking into account action control on the object of the limited disturbance. It is shown that when used in the control system structure of the iteration-inverse filter - invariance of the control system is provided to the perturbations, which allows for signal-parametric approach for building diagnostic models. The scheme of the formation of indirect features based on iteration-inverse filter to help distinguish its effect on the control object of the action of external perturbations change the subject. On the example of the control object in the form of inertial element, obtained dynamic characteristics of the diagnosing system with the iteration-inverse filter.

Key words: diagnosis, iterative-inverse filter, signal-parametric approach.

Кулик Анатолий Степанович – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедри систем управління летательных аппаратов, декан факультета систем управления летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kulik@d3.khai.edu.

Фирсов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем управління летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: firsov@d3.khai.edu

Резникова Ольга Викторовна – аспирант кафедри систем управління летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: amanz@d3.khai.edu.