

УДК 62-501.72.001.5:629.12

**В.Ю. Кушев, канд. техн. наук, доцент,
начальник научно-исследовательского управления**

*Научно-исследовательский центр “Государственный океанариум” Министерства
обороны и Национальной академии наук Украины*

99024 г. Севастополь, ул. Эпроновская, 7

тел. (0692)-24-33-79, факс (0692)-24-23-09, E-mail: oceanar@bios.inf.net

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭРГАТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Рассматривается метод идентификации, используемый при функциональном
диагностировании структурно сложных корабельных систем автоматизированно-
го управления, принадлежащих к классу эргатических.*

Увеличивающаяся сложность технических систем, используемых для решения различных задач, требует повышенного внимания к уровню их надежности не только на стадии проектирования, но и на стадии эксплуатации. В процессе эксплуатации высокий уровень надежности достигается путем своевременного выявления нарушений в системе и организации управления эксплуатацией по состоянию. Для этого, с целью получения полной информации о векторе состояния, в состав системы включаются наблюдатели, позволяющие идентифицировать или состояние объекта, или его параметры. В качестве примера можно привести работу [1], в которой решается задача разработки робастного наблюдателя, оценивающего вектор состояния в интересах реализации закона управления и обеспечения требуемого качества управления.

Задачи идентификации состояний и построения наблюдателя решаются далеко не тривиально даже для простых систем. Так в работе [2] показано, что решение задачи идентификации простого экспоненциального процесса релаксации приводит к нелинейной системе нормальных уравнений, не совсем удобной для решения. Проблема усугубляется для сложных систем. В упомянутой выше работе [1] решается задача построения робастной системы управления с наблюдателем состояния для сложного объекта управления, описываемого нелинейными сингулярно возмущенными уравнениями. Теоретические положения, полученные в [1], проверены численным методом на линейной системе второго порядка, содержащей один неизвестный параметр. Полученные погрешности оценок, не превысившие 10 %, с инженерной точки зрения вполне приемлемы. Однако открытым остается вопрос эффективности разработанного наблюдателя и метода в целом для систем высокого порядка, содержащих большое количество идентифицируемых параметров.

Таковыми системами высокого порядка являются, например, корабельные системы автоматизированного управления (КСАУ). Не останавливаясь подробно на особенностях объекта управления КСАУ, которые достаточно полно раскрыты в работе [3], отметим только следующий немаловажный факт. Поток отказов управляющей системы КСАУ на два-три порядка выше потока отказов объекта управления [4]. Здесь важную роль играют методы и средства технической диагностики. К числу последних можно отнести наблюдатели, обеспечивающие идентификацию состояния или параметров объекта диагностирования. При этом важно подчеркнуть требование разработки методов, ориентированных на автоматизацию процесса диагностирования.

Дело в том, что подавляющее большинство современных технических систем относится к классу эргатических. Расширение задач и функций таких систем, увеличение их сложности (например, за счет включения в состав системы средств диагностирования) расширяет и усложняет функции человека-оператора. Последнее, как известно, приводит к уменьшению уровня надежности эргатической системы в целом. В такой ситуации “не снижения” уровня надежности можно достичь только путем автоматизации процессов диагностирования и выбора таких режимов функционирования объекта диагностирования, которые или совпадают со штатными (что наиболее предпочтительно), или, по крайней мере, мало отличаются от них. Эти условия являются основными в обеспечении реализации трех основных физических принципов эргатических систем:

а) функционального гомеостазиса – наличия совокупности стабильных (в определенных пределах) функциональных поведений системы при выполнении ею любой из своих задач;

б) наименьшего взаимодействия – организации человеком-оператором такого своего поведения, когда при минимальном действии обеспечивается максимум эффективности всего эргатического организма при решении им любой из своих задач;

в) функциональной совместимости – такого объединения множества функций, выполняемых человеком-оператором, включенного определенным образом в организованную замкнутую систему управления, и функций, выполняемых системой, при котором допускается целенаправленное функционирование всей эргатической системы.

В результате приходим к необходимости решения фундаментальной проблемы – разработки автоматизированных методов функционального диагностирования эргатических динамических систем (ЭДС).

Решение этой проблемы актуально также для таких динамических систем, как корабельные системы автоматизированного управления. Это под-

тверждается многолетним опытом их эксплуатации, а также анализом особенностей структуры и функционирования [4].

Целью настоящей работы является разработка метода функциональной идентификации параметров эргатических динамических систем как в условиях нормального функционирования, так и в условиях действия возмущающих факторов.

Решение задачи функционального диагностирования технического компонента ЭДС будем искать на основе использования модели функционирования в виде системы линейных дифференциальных уравнений. Эту же модель целесообразно рассматривать и в качестве диагностической. Тогда в качестве диагностических признаков выступают коэффициенты системы дифференциальных уравнений, и задача сводится к оценке их значений. Для этого можно использовать любой из известных методов идентификации. Однако следует упрощать применяемые методы. В работе применен не сложный, но достаточно эффективный метод идентификации динамических систем, использующий, как отмечено выше, относительно простой математический аппарат. По этой причине назовем его каноническим.

Использование методов идентификации для диагностирования равносильно включению в состав линейной динамической системы (ЛДС) идентификатора состояния. Это не нарушает трех основных физических принципов эргатических систем. Наоборот, идентификатор состояния обеспечивает большую стабильность функциональных поведений человека-оператора, уменьшение его действий, связанных с контролем состояния ЛДС, и, наконец, сохраняет целенаправленность функционирования. Кроме того, введение идентификатора состояния снимает эмоциональную напряженность оператора.

Пусть некоторая ЛДС является объектом диагностирования и элементы этой системы описываются дифференциальными уравнениями порядка n_s

$$\sum_{i=0}^{n_s} a_{si} x_s^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{m_s} b_{sj} u_s^{(j)}(t), \quad (1)$$

где s - номер элемента ЛДС $s = \overline{1, r}$; r - число элементов в системе; $x_s(t)$, $u_s(t)$ - выходной и входной сигналы s -го элемента; a_{si}, b_{sj} - коэффициенты дифференциального уравнения s -го элемента; n_s, m_s - порядок левой и соответственно правой частей дифференциального уравнения s -го элемента, по условию физической реализуемости $m_s < n_s$.

Структурными параметрами дифференциальных уравнений (1) служат заданные числа n_s, m_s и коэффициенты a_{si}, b_{sj} , число которых равно $n_s + m_s$. Их рассматриваем в качестве диагностических признаков. Человек-оператор имеет априорные знания о состоянии системы (о коэффициентах ее

модели), а с введением идентификатора состояния получает возможность наблюдать эволюцию, предсказывать ее протекание и принимать решение об использовании ЭДС.

Принимаем, что накопление нарушений в элементах объекта диагностирования носит постепенный характер, а текущие значения коэффициентов a_{si} и b_{sj} являются случайными функциями времени, имеющими монотонный, медленно изменяющийся характер. Задача идентификации сводится к получению несмещенных оценок $\hat{a}_{si}$ и $\hat{b}_{sj}$ по наблюдениям на конечном интервале $[0, T]$ непрерывных функций времени $x_s(t)$ и $u_s(t)$ при условии, что коэффициенты a_{si} и b_{sj} дифференциальных уравнений на $[0, T]$ неизменны или их изменения пренебрежимо малы. Для решения поставленной задачи поступим следующим образом.

Представим в пространстве состояний каждое из r уравнений (1), выбрав, например, каноническую форму. Тогда после преобразований получим систему уравнений следующего вида

$$\begin{aligned}\dot{Y}_s(t) &= A_s Y_s(t) + B_s U_s(t); \\ Z_s(t) &= C_s Y_s(t) + D_s U_s(t),\end{aligned}\tag{2}$$

где $Y_s(t)$ - матрица-столбец переменных состояния s -го элемента; $U_s(t)$ - матрица-столбец управлений s -го элемента; $Z_s(t)$ - матрица-столбец наблюдаемых переменных s -го элемента; A_s, B_s - матрицы s -го элемента; C_s, D_s - матрицы наблюдателя состояний s -го элемента.

Представление уравнений (1) в пространстве состояний исключает необходимость нахождения производных от входных сигналов $u_s^{(j)}$ и, тем самым, повышает точность идентификации (не ставится цель строго обосновать это утверждение). Кроме того, выбором соответствующей формы представления можно упростить решение задачи оценки ненаблюдаемых переменных и построения наблюдателя состояния.

Математическая модель ЛДС представляет собой систему уравнений, составленную из r систем уравнений вида (2). После выполнения преобразований и исключения промежуточных переменных модель системы представляется в виде системы дифференциальных уравнений в пространстве состояний

$$\dot{Y}(t) = DY(t) + FU(t),\tag{3}$$

где $Y(t)$ - матрица-столбец переменных состояния ЛДС; $U(t)$ - матрица-столбец управлений ЛДС; D - матрица ЛДС размером $n \times n$; F - матрица воздействий размером $n \times w$; w - число регулирующих и возмущающих воздействий в ЛДС.

Матрицы D и F характеризуют состояние технического компонента ЭДС и в общем случае нестационарны. Однако на интервале наблюдения $[0, T]$ их значения принимаем неизменными.

Задача формулируется следующим образом: по наблюдениям на интервале времени $[0, T]$ переменных состояния $Y(t)$, их производных $\dot{Y}(t)$ и управлений $U(t)$ необходимо подобрать параметры D и F такими, чтобы равенство (3) было выполнено или его правая и левая части минимально отличались. Для этого построим функцию невязки правой и левой частей системы дифференциальных уравнений (3)

$$Q(D, F) = \int_0^T [\dot{Y}(t) - DY(t) - FU(t)]^2 dy. \quad (4)$$

Функция (4) неотрицательна, ее минимум равен нулю в случае совпадения структуры модели и объекта диагностирования, содержит $n + m$ переменных.

Функцию невязки часто удобно строить для каждого уравнения системы дифференциальных уравнений (3), что позволяет существенно сократить объем вычислительной работы. Для ее минимизации воспользуемся необходимым условием существования экстремума

$$\partial Q(d_{ij}, f_{ip}) / \partial d_{ij} = 0; \quad \partial Q(d_{ij}, f_{ip}) / \partial f_{ip} = 0, \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, n}; \quad p = \overline{1, w}, \quad (5)$$

где d_{ij} - элементы матрицы D ; f_{ip} - элементы матрицы F .

После дифференцирования по параметрам d_{ij} и f_{ip} и последующего преобразования получим n систем линейных алгебраических уравнений k_i -го порядка, в общем случае имеющих вид

$$\sum_{j=1}^n d_{qj} \beta_{qj} + \sum_{p=1}^w f_{qp} \lambda_{qp} = \alpha_q, \quad q = \overline{1, k_i}, \quad (6)$$

где k_i - число слагаемых в правой части i -го уравнения системы (3); β_{qi} , λ_{qp} - коэффициенты уравнений идентификации, полученные интегрированием на интервале $[0, T]$ всех парных произведений переменных состояния, их производных и воздействий.

Выражение (5) представляет собой систему k_i линейных алгебраических уравнений идентификации элемента ЛДС. Решая эту систему любым из известных методов, получаем оценки $\hat{D}$ и $\hat{F}$ ЛДС (3), а после пересчета - оценки $\hat{a}_{si}$ и $\hat{b}_{sj}$ текущих значений коэффициентов a_{si} и b_{sj} . Сравнивая полученные оценки с исходными значениями коэффициентов уравнения (1)

$$\delta a_{si} = (a_{si}^0 - \hat{a}_{si}) / a_{si}^0; \quad \delta b_{sj} = (b_{sj}^0 - \hat{b}_{sj}) / b_{sj}^0, \quad (7)$$

получаем искомые относительные отклонения, которые могут быть использованы для прогнозирования изменения состояния и формирования сигналов коррекции.

Однозначность решения системы уравнений идентификации (5) достигается при отличном от нуля значении детерминанта, т.е. при $\det \neq 0$. Если $\det \approx 0$, то следует на входе ЛДС применить другое задающее воздействие (например, увеличив скорость сигнала) или изменить структуру модели (1), варьируя, например, числа n_s и m_s).

Предложенный метод идентификации ЛДС обладает следующими достоинствами:

- высокой эффективностью идентификации многомерных и много-связных ЛДС без разрыва связей между элементами;
- возможностью использования метода при одновременном действии нескольких регулирующих и возмущающих воздействий на штатных входах ЛДС;
- достаточно высокой помехоустойчивостью;
- возможностью работы ЭДС в реальном масштабе времени;
- простотой получения оценок коэффициентов модели в силу ограниченного числа выполняемых математических операций;
- универсальностью и возможностью реализации на ЭВМ;
- простотой перехода от параметрической модели (1) элемента ЛДС к непараметрической в виде частотных характеристик.

Важно отметить, что реализация метода не требует подачи специально сформированных входных сигналов, на входе ЛДС действуют только штатные воздействия. Особенностью метода является необходимость восстановления ненаблюдаемых переменных состояния и возмущающих воздействий, используя, например, методы фильтрации Калмана.

Целесообразно оценить эффективность предложенного метода в условиях функционирования линейной динамической системы, а также влияние процедур восстановления ненаблюдаемых переменных состояния и возмущающих воздействий на величину погрешности идентификации параметров.

Библиографический список

1. Потапенко Е.М. Робастные комбинированные системы управления с наблюдателями / Е.М. Потапенко // Проблемы управления и информатики. — 1995. — № 2. — С. 36 – 44.
2. Л.В. Иванова. Идентификация процессов релаксации сложных систем с помощью модифицированного метода наименьших квадратов / Л.В. Иванова, В.А. Исаев, А.В. Исаева // Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании: “ИНФОТЕХ-2002”. Матер. междунар. науч.-практ. конф., Киев – Севастополь, 30 сентября – 5 октября 2002 г., НТО РЭС Украины, 2002. — С. 89 – 90.

3. Вольский С.Г. Принципы построения систем управления автоматизированных атомных энергетических установок: Учеб. пособие / С.Г. Вольский, Н.В. Грунтович, Д.И. Ремезов. — ВМФ, 1987. — 122 с.

4. Кушев В.Ю. Надежность систем управления и защиты реакторов ВМ-4. Учеб. пособие. — Севастополь: СВВМИУ, 1986. — 304 с.

Поступила в редакцию 17.01.2003 г.