

УДК 621.03

Н.А. ЗАХАРОВ, С.В. КАЛИН, В.И. КЛЕПИКОВ, Д.С. ПОДХВАТИЛИН

ФГУП ИТМуВТ им. С.А. Лебедева РАН, Россия

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассмотрены подходы к построению робастных алгоритмов аналитического резервирования, основанные на эллипсоидальной аппроксимации множества неопределенности обновляющего процесса наблюдателя состояния. На примере системы управления газотурбинным двигателем показано, что применение робастных алгоритмов позволяет выполнять гарантированное обнаружение отказов в условиях неполно и неточно известных параметров модели.

распределенная САУ, контроль исправности, модель, наблюдатель, робастный алгоритм

Введение

Современные цифровые распределенные системы автоматического управления (САУ) характеризуются большим числом функций регулирования, контроля и диагностики, а также высокими требованиями к точностям регулирования. Это предъявляет высокие требования к надежности и точности измерительных каналов САУ. В то же время именно компоненты измерительных каналов – чувствительные элементы, первичные преобразователи, каналы питания и связи – работают в наиболее тяжелых условиях эксплуатации и подвержены повышенным механическим, термическим и электромагнитным нагрузкам. Это приводит к тому, что отказы измерительных каналов составляют до 60% отказов САУ.

Аппаратурные средства контроля исправности измерительных каналов во многих случаях позволяют выявлять лишь катастрофические (обрыв или короткое замыкание) отказы, но и для такого контроля аппаратура может быть достаточно громоздкой, как, например, для обнаружения короткого замыкания в цепи термопары или обрыва в цепи емкостного датчика.

Использование встроенных моделей объекта, работающих в реальном времени, позволяет получить целый ряд дополнительных возможностей по повы-

шению качества регулирования и эксплуатационных характеристик системы:

- фильтрация шумов и сбоев;
- восстановление неизмеряемых параметров для целей диагностики и управления;
- обнаружение нештатных состояний объекта управления и системы;
- обнаружение отказов элементов объекта управления;
- диагностика состояния и параметрической деградации объекта.

Для газотурбинного двигателя оптимальным представляется выбор упрощенной нелинейной модели, которая по сравнению с полными поэлементными, непараметрическими, нейросетевыми моделями обладает следующими преимуществами:

- раздельное задание и возможность раздельной адаптации статических характеристик и динамических коэффициентов;
- возможность коррекции параметров модели по внешним условиям эксплуатации;
- наличие хорошо отработанных алгоритмов идентификации параметров упрощенной нелинейной модели по процессам полных поэлементных моделей и по результатам натуральных экспериментов;
- возможность алгоритмического получения

коэффициентов линейных моделей в пространстве состояний для целей синтеза алгоритмов;

- относительно невысокие требования к вычислительным ресурсам, позволяющие реализовать модель в узле распределенной САУ.

Результаты исследований

Упрощенная нелинейная модель строится в приведенных параметрах, соотношения для которых известны из литературы [1].

Упрощенная нелинейная модель двигателя описывается линиями установившихся режимов и динамическими уравнениями с параметрами, зависящими от режима работы и условий эксплуатации. Такая модель для целей синтеза может быть линеаризована и представлена в виде:

$$\dot{x} = A_a \cdot x + B_a \cdot u_a; \quad y_a = C_a \cdot x + D_a \cdot u_a, \quad (1)$$

где x – вектор состояний; y_a – вектор наблюдений; u_a – вектор управляющих воздействий; A_a, B_a, C_a, D_a – матрицы соответствующих размерностей.

Модель (1) является идеализированной. Она не учитывают целый ряд факторов, влияющих на работу объекта управления – его состояние, режимы эксплуатации и др.

Влияние данных факторов приводит к тому, что параметры модели содержат переменные во времени погрешности, причем скорость изменения этих погрешностей колеблется от близкой к нулю (выработка ресурса) до практически скачкообразной (отборы мощности).

С учетом статических и динамических погрешностей матрицы линейной модели двигателя могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} A_a &= A \pm \nabla A, \quad B_a = B \pm \nabla B; \\ C_a &= C \pm \nabla C, \quad D_a = D \pm \nabla D, \end{aligned} \quad (2)$$

где A, B, C, D – матрицы номинальных значений, $\nabla A, \nabla B, \nabla C, \nabla D$ – матрицы граничных значений ошибок параметров.

Матрицы $\nabla A, \nabla B, \nabla C, \nabla D$ могут быть напрямую рассчитаны из погрешностей, определенных для упрощенной нелинейной модели, или могут быть определены, например, путем разложения в ряд Тейлора критерия качества, оптимизируемого в процессе идентификации линейной модели [2].

Выявление и учет при синтезе алгоритмов фактических характеристик погрешностей измерения является трудоемкой задачей, поэтому на практике используются различные упрощенные описания этих характеристик [2, 3].

В рамках принятого гарантированного подхода к построению алгоритмов обнаружения и парирования отказов для описания погрешностей измерительных каналов необходима минимальная, но достоверно известная информация. Такой информацией является величина интервалов возможного варьирования измеряемой величины без учета характера этого варьирования. Информацию, поступающую в систему управления, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} y &= y_a \pm \delta y + V_y(t_y, t); \\ u &= u_a \pm \delta u + V_u(t_u, t). \end{aligned} \quad (3)$$

где y, u – векторы измерения параметров объекта и управляющих воздействий;

y_a, u_a – векторы фактических значений параметров объекта и управляющих воздействий;

$\delta y, \delta u$ – векторы максимально возможных погрешностей измерения;

$V_y(t_y, t), V_u(t_u, t)$ – векторы возможных отказов, являющиеся функциями времени t .

По характеру воздействия на основной измеряемый сигнал, отказы могут иметь вид смещения, дрейфа, колебаний, шума, комбинированного типа. По степени воздействия на характер работы системы отказы могут быть классифицированы как катастрофические и параметрические. Катастрофический отказ приводит к недопустимому снижению режима работы объекта или к его повреждению.

Параметрический отказ приводит к снижению точности и качества регулирования.

Без потери общности при синтезе алгоритмов будем моделировать отказы измерительных каналов с помощью аддитивной составляющей:

$$\begin{aligned} y &= y_a \pm \partial y + V_y(t_y, t); \\ u &= u_a \pm \partial u + V_u(t_u, t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $V_y(t_y, t), V_u(t_u, t)$ - векторы возможных отказов, являющиеся функциями времени t и возникающие в моменты времени $t=t_y$ и $t=t_u$, соответственно.

Рассмотрим возможность использования наблюдателя состояния для целей обнаружения параметрических отказов. Для линейной системы (1) построим наблюдатель состояния [4, 5]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + Kz; \\ \hat{y} &= C\hat{x} + Du; \\ z &= \hat{y} - y, \end{aligned} \quad (5)$$

где \hat{x}, \hat{y} - векторы оценок состояния и наблюдения системы;

Z - вектор невязок наблюдателя;

K - матричный коэффициент наблюдателя.

Вычитая уравнения наблюдателя из уравнений системы, получим уравнения для вектора ошибок оценок состояния e и вектора обновляющего процесса z :

$$\dot{z} = \hat{y} - y = C * e + d + f; \quad (6)$$

$$\dot{e} = \hat{x} - x = F * e + g + h, \quad (7)$$

где

$$d = (\pm \nabla C * x \pm \nabla D * u_a \pm \partial y \pm \nabla D * \partial u);$$

$$g = (\pm \nabla A \pm K * \nabla C) * x +$$

$$(\pm \nabla B \pm K * \nabla D) * u_a \pm$$

$$(B + K * D) * \partial u \pm K * \partial y -$$

векторы возмущений, вызванные наличием ошибок модели;

$$f = V_y(t_y, t) - D * V_u(t_u, t);$$

$$h = (K * D - B) * V_u(t_u, t) - K * V_y(t_y, t) -$$

векторы возмущений, вызванные возможными отказами в системе; e - вектор ошибок восстановления состояния; $F = A - KC$ - собственная матрица наблюдателя.

Точные значения векторов d и g не известны, однако, для них могут быть построены эллипсоидальные области, задаваемые неравенством вида

$$(Q^{-1}(X - a), (X - a)) \leq 1, \quad (8)$$

где a - n -мерный вектор, задающий координаты центра эллипсоида; Q - симметрическая положительно определенная матрица размерности $(n * n)$; $()$ - обозначение операции скалярного произведения.

Таким образом, можно записать, что все возможные значения векторов d и g лежат внутри эллипсоидов с центрами в начале координат и матрицами Q_d и Q_g :

$$\begin{aligned} \bar{d} &\subseteq E(0, Q_d); \\ \bar{g} &\subseteq E(0, Q_g). \end{aligned} \quad (9)$$

Используя операции сложения и пересечения эллипсоидов для вектора ошибок оценок состояния e и вектора обновляющего процесса z можно построить соответствующие эллипсоидальные области:

$$e \subseteq E(a, Q_e);, \quad (10)$$

$$z \subseteq E(b, Q_z). \quad (11)$$

С учетом дифференциального уравнения (7) поведение центра эллипсоида e будет описываться уравнениями эволюции эллипсоидов [6]:

$$\dot{a} = F \cdot a + h;$$

$$\dot{Q}_e = F \cdot Q_e + Q_e \cdot F^T +$$

$$+ q \cdot Q_e + q^{-1} \cdot Q_g; \quad (12)$$

$$q = \left[n^{-1} \cdot Tr(Q_e^{-1} \cdot Q_g) \right]^{1/2}.$$

При отсутствии отказов ($h=0, f=0$) уравнение (12) даст нулевое решение:

$$a(t)=0, \quad (13)$$

нулевым, следовательно, будет и вектор b в уравнении (11):

$$b(t)=0. \quad (14)$$

Это означает, что вектор обновляющего процесса z наблюдателя при отсутствии отказов принимает значения, лежащие вблизи начала координат в ограниченной области $E(0, Q_z)$, обусловленной наличием ошибок модели и погрешностей измерения. В зависимости от степени динамичности текущих процессов в системе управления область Q_z может расширяться (при резких переходных процессах), либо стягиваться к нулю до значений, соответствующих ошибкам задания статических характеристик (на установившихся режимах).

При возникновении отказа в одном или нескольких измерительных каналах системы в соответствии с выражениями (6,7) происходит смещение центров a и b , а, следовательно, и самих эллипсоидальных областей $E(a, Q_z)$ и $E(b, Q_z)$. Это означает, что при определенной величине отказа текущий вектор обновляющего процесса z наблюдателя (9) будет пересекать границу области $E(0, Q_z)$, построенной из условия отсутствия отказов.

Для иллюстрации изложенного на рис. 1 показаны проекции векторов z и областей $E(0, Q_{z1})$ и $E(b, Q_{z2})$ на плоскость ошибок наблюдения $(z_1, 0, z_2)$ в некоторые моменты времени.

Здесь вектор $z(t_1)$ соответствует нормальной работе системы, т.к. он лежит внутри области $E(0, Q_{z1})$, построенной из условия отсутствия отказов. Вектор $z(t_3)$ соответствует наличию в системе отказа, т.к. выходит за пределы области $E(0, Q_{z1})$. Вектор $z(t_2)$ будет квалифицирован алгоритмом как случай нормальной работы системы, т.к. он лежит внутри области $E(0, Q_{z1})$, хотя он может соответствовать и параметрическому отказу, величина которого соизмерима с ошибками модели при данной степени динамичности процессов системы, также этот век-

тор одновременно принадлежит и области $E(b, Q_{z2})$, соответствующей наличию отказа.

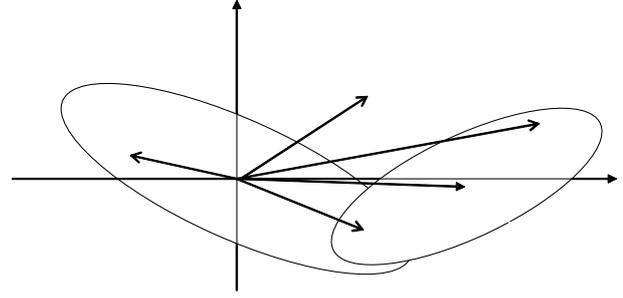


Рис. 1. Пример взаимного расположения векторов обновляющего процесса и областей их неопределенности

Параметрический отказ, не приводящий к выходу конца вектора обновляющего процесса за границу области $E(0, Q_z)$, является нераспознаваемым, т.к. его влияние на обновляющий процесс соизмеримо с влиянием ошибок модели и погрешностей измерения. Другим примером нераспознаваемого отказа является появление вектора $z(t_4)$, который лежит за пределами обеих областей, т.е. отказ, приведший к появлению вектора $z(t_4)$, не рассматривался при синтезе алгоритма обнаружения отказов.

Таким образом, робастный алгоритм обнаружения отказов заключается в том, чтобы:

- получить текущие оценки вектора обновляющего процесса z наблюдателя (9);
- рассчитать текущую область возможных значений этого вектора, аппроксимированную эллипсоидом (14), и построенную из условия отсутствия отказов;
- проверить находится ли вектор z внутри области $E(0, Q_z)$, расположенной вокруг начала координат.

Выход конца вектора z за пределы $E(0, Q_z)$:

$$(Q_z^{-1}z, z) > 1; \quad (15)$$

свидетельствует о наличии в системе отказа.

Качество работы робастного алгоритма обнаружения отказов определяется тем, какова величина параметрического отказа может быть обнаружена алгоритмом при данной величине ошибок модели и

погрешностей измерения. Т.е. чем меньше параметрические отказы способен фиксировать алгоритм, тем выше его качество. Анализ условия (15), выполнение которого свидетельствует о наличии отказа, показывает, что параметрический отказ будет тем успешнее обнаружен, чем меньше эллипсоидальная область неопределенности $E(0, Q_z)$, (построенная из условия отсутствия отказов) и чем больше составляющая вектора z , вызванная наличием отказа.

Оба эти фактора зависят от выбора матричного коэффициента усиления K наблюдателя состояния (9). Построим критерий оптимизации качества работы алгоритма как функции матричного коэффициента K .

Величину области $E(0, Q_{zk})$, характеризующую чувствительность наблюдателя состояния к ошибкам модели и погрешностям измерения, удобно оценивать ее объемом [6], который пропорционален величине определителя матрицы Q_{zk} . Введем критерий чувствительности наблюдателя к ошибкам моделирования:

$$J_0 = \det(Q_{zk}). \quad (16)$$

Синтезируемый оптимальный наблюдатель должен обеспечивать максимум нормы вектора z при минимуме объема области неопределенности Q_{zk} для любого из отказов, поэтому результирующий критерий зададим в виде:

$$J(K) = \sum_{k=1}^{m+r} \frac{p_k * \|z\|_k}{\det(Q_{zk})}, \quad (17)$$

где коэффициенты p_k обеспечивают выравнивание чувствительности критерия к отказам различных каналов.

Критерий J является функцией коэффициента K наблюдателя состояния (9). При синтезе, однако, необходимо учесть, что для обеспечения устойчивости и требуемого быстродействия, коэффициент K должен придавать собственным значениям матрицы наблюдателя $F=A-KC$ заданное расположение на комплексной плоскости. Следовательно, задача син-

теза оптимального наблюдателя состояния окончательно запишется в виде:

$$J(K) \rightarrow \max; \quad (18)$$

$$S(F(K)) = S_{given}, \quad (19)$$

где $S(F(K))$, S_{given} , - фактическое и заданное множества корней матрицы F , являющейся функцией матрицы K .

Предпосылкой решения задачи (18, 19) является тот факт, что для обеспечения условия (19) необходимо лишь количество элементов матрицы K , равное порядку модели объекта. Назовем эти элементы зависимыми. В то же время матрица K содержит $2m$ элементов, где m – количество каналов, информация которых поступает в наблюдатель. Таким образом, $2(m-2)$ элементов матрицы K (назовем их независимыми) могут быть произвольно выбраны с тем, чтобы доставить максимум критерию $J(K)$. Автоматизированная процедура синтеза реализована в пакете MatLab/Simulink. Рассмотрим пример синтеза и моделирования алгоритма обнаружения отказов на примере модели двухвального двухконтурного газотурбинного двигателя. Матрицы системы имеют значения:

$$A = [-3,25 \ -0,26; \ -0,37 \ -1,63];$$

$$B = [0,024 \ 0,072 \ -1,17 \ 0,825; \ 0,012 \ 0,005 \ -0,129 \ -0,41];$$

$$C = [1 \ 0; \ 0 \ 1; \ 0,174 \ 0,373; \ 0,026 \ 0,05; \ -4,03 \ -16,34];$$

$$D = [0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0,0022 \ -0,00214 \ 0 \ 0; \ 0,00025 \ -0,00122 \ 0 \ 0; \ 0,19 \ -0,025 \ 0 \ -1.3].$$

Матрицы ошибок модели зададим в виде 10% отклонений от номинальных значений:

$$\nabla A = 0.1 * A; \ \nabla B = 0.1 * B; \ \nabla C = 0.1 * C; \ \nabla D = 0.1 * D.$$

Ошибки датчиков и исполнительных механизмов примем в виде:

$$\delta u = [0,01; 0,01; 0,01; 0,01; 0,01];$$

$$\delta u = [0,01; 0,01; 0,01; 0,01].$$

Стартовые значения эллипсоидов примем в виде:

$$Qe = [0,1 \ 0,023; \ 0,03 \ 0,12]; \ Qg = [0,03 \ 0; \ 0 \ 0,01].$$

Собственные значения матрицы $F=A-KC$ зададим равными $s_1 = s_2 = -10$.

Стартовые значения коэффициента K :

$$K=[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1];$$

После схождения алгоритма получим:

$$K_0 = [5,9080 \ 0,8165 \ 0,4491 \ 0,5765 \ -0,2954 \\ 3,6205 \ 15,6314 \ 1,1806 \ 2,2056 \ 0,4050].$$

Выводы

Результаты моделирования показывают, что оптимальная настройка наблюдателя обеспечивает существенно более высокую точность обнаружения отказов по большинству каналов измерения. Желаемое перераспределение точностей обеспечивается выбором коэффициентов чувствительности алгоритма p_k в критерии оптимизации. Характер процессов, протекающих в алгоритме обнаружения отказов, показан на рис. 2.

Из приведенного процесса видно, что при резких возмущениях по управляющему воздействию из-за наличия ошибок модели алгоритм может кратковременно (1-2 такта счета) выдавать ложные сигналы появления отказов. Для их устранения необходимо применять фильтрацию сигналов отказов.

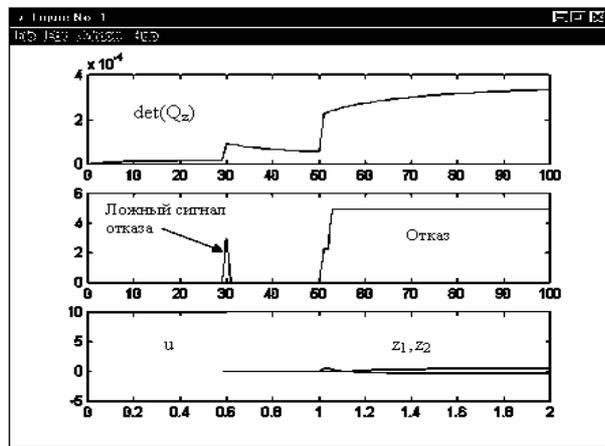


Рис. 2. Характер протекания процессов в алгоритме обнаружения отказов

Литература

1. Любомудров Ю.В. Применение теории подобия при проектировании систем управления газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
2. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. В.Т. Дедыша. – М. Машиностроение, 1984. – 288с.
3. Myers L.P., Baer-Riedhart J.L. Fault detection and accommodation testing on an F100 engine in F15 airplane. – NASA-TM-86735, 1985. – 320 p.
4. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М. Машиностроение, 1976. – 306 с.
5. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems. Wiley-Interscience, A Division of John Wiley & Sons Inc., N.Y.-London-Sydney-Toronto, 1972.
6. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. – М. Наука, 1988. – 192 с.

Поступила в редакцию 22.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Е. Федоровия, Национальный аэрокосмический университет, им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.