

А. Н. Жирабок^{1,2}, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru, Ким Чхун Ир¹, аспирант,

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток

Виртуальные датчики в задаче функционального диагностирования

Рассматривается задача построения виртуальных датчиков в технических системах, описываемых линейными моделями, для решения задач функционального диагностирования. Приводятся соотношения, позволяющие построить датчик минимальной сложности, оценивающий заданную компоненту вектора состояния. Теоретические результаты иллюстрируются примером.

Ключевые слова: линейные системы, дефекты, функциональное диагностирование, виртуальные датчики, наблюдатели, идентификация

Введение

Функциональное диагностирование (ФД) является одним из мощных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем, оно позволяет проводить проверку правильности функционирования системы в процессе выполнения ею своих основных функций и оперативно поставлять информацию о возникающих сбоях и дефектах [1, 2]. Одним из существенных препятствий на пути эффективной реализации методов ФД является недостаточное число датчиков, которыми оснащена диагностируемая система. Неэффективность этих методов здесь может проявиться как в значительной сложности построенных средств диагностирования, так и в невозможности локализации и идентификации дефектов, что не позволит получить решение задачи обеспечения отказоустойчивости системы.

Простейшим выходом из этой ситуации является использование дополнительных датчиков, что приводит к дополнительным затратам и не всегда реализуемо на практике. К тому же датчики являются одними из наименее надежных элементов системы.

Более простым и изящным способом является использование так называемых виртуальных датчиков [3, 4], которые строятся на основе наблюдателей Люенбергера и в работах [3, 4] имеют размерность, совпадающую с размерностью исходной системы. В настоящей работе ставится и решается задача построения виртуальных датчиков минимальной размерности, оценивающих заданные компоненты вектора состояния объекта диагностирования.

1. Основные соотношения

Предполагается, что диагностируемая система описывается уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + L\rho(t), \\ y(t) &= Hx(t) + Dd(t).\end{aligned}\quad (1.1)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода (показания имеющихся датчиков), F , G , L , H и D — известные матрицы соответствующих размеров; функция $d(t)$ отражает дефекты в некотором датчике, при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефектов $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; слагаемое $L\rho(t)$ описывает действующее на систему возмущение; $\rho(t)$ предполагается неизвестной функцией времени.

Рассмотрим ситуацию, когда задача идентификации дефекта, т. е. оценки функции $d(t)$, не может быть решена из-за недостаточного числа имеющихся датчиков, а использование дополнительных датчиков невозможно или нецелесообразно по ряду причин. Требуется построить виртуальный датчик для переменной $y_v(t) = H_v x(t)$ с известной матрицей-строкой H_v ; способ ее определения приведен в разделе 4.

Решение рассматриваемой задачи состоит в построении наблюдателя, оценивающего переменную $y_v(t)$ и, таким образом, выполняющего функцию виртуального датчика. Такой наблюдатель должен обладать двумя свойствами. Во-первых, для обеспечения его устойчивости он должен оценивать некоторую компоненту вектора выхода $y_*(t) = H_* x_v(t)$, которая при $D = 0$, $L = 0$ и после окончания переходного процесса определяется матрицей R_* в виде

$y_*(t) = R_*y(t)$, для формирования невязки $r(t) = R_*y(t) - y_*(t)$; здесь $x_v(t)$ — вектор состояния наблюдателя. Компонента $y_*(t)$ и эта матрица неизвестны, они определяются в процессе решения основной задачи. Во-вторых, наблюдатель должен оценивать заданную переменную $y_v(t) = H_v x(t)$. Для решения задачи введем составную матрицу $H_0 = \begin{pmatrix} H \\ H_v \end{pmatrix}$ и примем вначале, что $D = 0$.

Уравнение искомого наблюдателя имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_v(t) &= F_*x_v(t) + J_*y_0(t) + G_*u(t) + J_vr(t); \\ y_*(t) &= H_*x_v(t); \\ y_v(t) &= H_{*v}x_v(t) + Qy(t),\end{aligned}\quad (1.2)$$

где F_* , J_* , J_v , G_* , H_* , H_{*v} , Q — матрицы, подлежащие определению,

$$y_0(t) = H_0x(t) = \begin{pmatrix} H \\ H_v \end{pmatrix} x(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ y_v(t) \end{pmatrix}.$$

Решение задачи осуществляется в два этапа: на первом строится модель

$$\begin{aligned}\dot{x}_v(t) &= F_*x_v(t) + J_*y_0(t) + G_*u(t); \\ y_*(t) &= H_*x_v(t) = R_*y(t)\end{aligned}\quad (1.3)$$

с последующей проверкой возможности выполнения равенства

$$y_v(t) = H_{*v}x_v(t) + Qy(t),\quad (1.4)$$

на втором ищется матрица J_v , обеспечивающая устойчивость наблюдателя.

2. Построение модели

Для получения решения на первом этапе матрицы F_* и H_* ищутся в каноническом виде

$$\begin{aligned}F_* &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \\ H_* &= (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0).\end{aligned}\quad (2.1)$$

Известно [5], что если пара (F_*, H_*) наблюдаема, такое представление существует; в противном случае модель (1.3) можно представить

в канонической форме наблюдаемости [5] и также искать матрицы F_* и H_* в виде (2.1).

Как и при решении задачи ФД, предполагается, что после окончания переходного процесса векторы $x(t)$ и $x_v(t)$ связаны матрицей Φ , подлежащей определению:

$$x_v(t) = \Phi x(t).$$

Из (1.1) и (1.3) тогда можно получить уравнения, связывающие матрицы, описывающие эти системы [6, 7]:

$$R_*H = H_*\Phi, \Phi F = F_*\Phi + J_*H_0, G_* = \Phi G. \quad (2.2)$$

Из (1.3), (2.1) и (2.2) можно получить следующие уравнения [6, 7]:

$$\begin{aligned}R_*H &= \Phi_1; \Phi_i F = \Phi_{i+1} + J_{*i}H_0, i = 1, \dots, k-1; \\ \Phi_k F &= J_{*k}H_0.\end{aligned}\quad (2.3)$$

Как показано в работах [6, 7], уравнения (2.3) могут быть сведены в одно уравнение

$$\begin{aligned}R_*HF^k &= J_{*1}H_0F^{k-1} + J_{*2}H_0F^{k-2} + \\ &+ \dots + J_{*k}H_0.\end{aligned}$$

Запишем его в виде

$$(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})V^{(k)} = 0, \quad (2.4)$$

где

$$V^{(k)} = \begin{pmatrix} HF^k \\ H_0F^{k-1} \\ \vdots \\ H_0 \end{pmatrix}.$$

В работах [6, 7] показано, что для обеспечения нечувствительности к возмущению строка $(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})$ должна удовлетворять дополнительному условию

$$(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})L^{(k)} = 0,$$

где

$$L^{(k)} = \begin{pmatrix} HL & HFL & \dots & HF^{k-1}L \\ 0 & H_0L & \dots & H_0F^{k-2}L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Последнее уравнение и уравнение (2.4) можно записать вместе:

$$(R_* - J_{*1} \dots - J_{*k})(V^{(k)} L^{(k)}) = 0; \quad (2.5)$$

полученное уравнение имеет нетривиальное решение, если

$$\text{rank}(V^{(k)} L^{(k)}) < l + (l+1)k. \quad (2.6)$$

Для построения модели из условия (2.6) определяется минимальная размерность k и из уравнения (2.5) — строка $(R_* - J_{*1} \dots - J_{*k})$, затем на основе соотношений (2.2) строится матрица Φ и проверяется выполнение равенства (1.4). Для этого представим его в виде

$$H_v x(t) = H_{*v} \Phi x(t) + Q H x(t),$$

что эквивалентно равенству

$$H_v = H_{*v} \Phi + Q H = (H_{*v} \quad Q) \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Если

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \\ H_v \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

то матрица-строка H_v выражается через матрицу $\begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}$, и построенная модель оценивает заданную компоненту $y_v = H_v x$; матрицы H_{*v} и Q определяются из алгебраического уравнения (2.7). Если (2.8) не выполняется, нужно найти другое решение уравнения (2.5) при прежней или увеличенной размерности k .

Предполагая, что условие (2.8) выполняется, примем $G_* = \Phi G$, на чем заканчивается процедура построения модели.

3. Построение наблюдателя

Для построения матрицы J_v , обеспечивающей устойчивость наблюдателя, проведем ряд тождественных преобразований первого уравнения (1.2):

$$\begin{aligned} \dot{x}_v(t) &= F_* x_v(t) + J_* y_0(t) + G_* u(t) + J_v r(t) = \\ &= F_* x_v(t) + J_* y_0(t) + G_* u(t) + J_v (R_* y(t) - y_*(t)) = \\ &= (F_* - J_v H_*) x_v(t) + J_* y_0(t) + G_* u(t) + J_v R_* y(t). \end{aligned}$$

Для анализа устойчивости введем ошибку по состоянию $e(t) = \Phi x(t) - x_v(t)$ и с учетом соотношений (1.1), (1.2) и (2.2) запишем и преобразуем уравнение для $\dot{e}(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \Phi F x(t) + \Phi G u(t) - F_* x_v(t) - \\ &- J_* y_0(t) - G_* u(t) - J_v (R_* y(t) - y_*(t)) = \\ &= F_* \Phi x(t) - F_* x_v(t) - J_v R_* H x(t) + J_v H_* x_v(t) = \\ &= F_* \Phi x(t) - J_v H_* \Phi x(t) - F_* x_v(t) + J_v H_* x_v(t) = \\ &= (F_* - J_v H_*) \Phi x(t) - (F_* - J_v H_*) x_v(t) = \\ &= (F_* - J_v H_*) e(t). \end{aligned}$$

Из полученного выражения ясно, что если матрица $(F_* - J_v H_*)$ устойчива, то $e(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Известно, что если пара (F_*, H_*) наблюдаема, то существует такая матрица J_v , что $(F_* - J_v H_*)$ устойчива. Из соотношения (2.1) с очевидностью следует наблюдаемость пары (F_*, H_*) и, следовательно, существование матрицы J_v , обеспечивающей устойчивость матрицы $(F_* - J_v H_*)$.

Будем искать J_v в виде $J_v = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_k)^T$. Тогда

$$\begin{aligned} F_* - J_v H_* &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} - \\ - J_v (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0) &= \begin{pmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ -a_3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -a_k & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_k$ связаны с собственными числами $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ матрицы $F_* - J_v H_*$ известными соотношениями:

$$\begin{aligned} a_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k), \\ a_2 &= \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \dots + \lambda_{k-1} \lambda_k, \dots, a_k = \\ &= (-1)^k \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k. \end{aligned}$$

Исходя из заданных требований к качеству переходного процесса можно задать собственные числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ и определить коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_k$.

Отметим, что из-за наличия слагаемого $J_* y_0(t)$ в модели (1.3) может появиться обратная связь по переменной $y_v(t) = H_{*v} x_v(t) + Q y(t)$, что приведет к матрице F_* , отличной от канониче-

ского вида (2.1). В этом случае выбор коэффициентов $a_1, a_2, \dots, a_k$ должен быть осуществлен так, чтобы собственные числа матрицы $F_* - J_v H_*$ удовлетворяли требованию устойчивости. Сделать это можно, выразив в общем виде собственные числа матрицы $F_* - J_v H_*$ через коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_k$, задав числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ и найдя из полученных уравнений искомые коэффициенты.

4. Определение матрицы H_v

Вид матрицы H_v определяется решаемой диагностической задачей. В качестве примера рассмотрим задачу идентификации дефекта в системе (1.1) при $D \neq 0$, т. е. оценки функции $d(t)$. Опуская детали решения (их можно найти в работе [6]), отметим только, что вначале строится модель, нечувствительная к возмущению:

$$\begin{aligned}\dot{x}_0(t) &= F_0 x_0(t) + J_0 y(t) + G_0 u(t); \\ y_0(t) &= H_0 x_0(t) = R_0 y(t),\end{aligned}$$

подобная (1.3), на основе которой далее строится скользящий наблюдатель.

Особенность задачи идентификации дефекта в датчиках состоит в том, что для реализации скользящего режима должно выполняться условие $R_0 D = 0$. Для его учета вводится матрица D^0 максимального ранга такая, что $D^0 D = 0$, тогда $R_0 = S D^0$ для некоторой матрицы S . Известно [6], что матрицы S и J_0 определяются из уравнения

$$(S \quad -J_{01} \quad \dots \quad -J_{0k})(V_0^{(k)} \quad D_0^{(k)}) = 0 \quad (4.1)$$

подобного (2.4), где

$$\begin{aligned}V_0^{(k)} &= \begin{pmatrix} D^0 H F^k \\ H F^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}; \\ D_0^{(k)} &= \begin{pmatrix} D^0 H L & D^0 H F L & \dots & D^0 H F^{k-1} L \\ 0 & H L & \dots & H F^{k-2} L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

Оно имеет нетривиальное решение, если

$$\text{rank}(V_0^{(k)} \quad D_0^{(k)}) < l(k+1) - 1. \quad (4.2)$$

Невыполнение этого условия при всех $k < n$ может быть обусловлено наличием как требования $R_0 D = 0$, так и требования нечувствитель-

ности к возмущению, задаваемому матрицей $D_0^{(k)}$ в (4.1). Использование виртуального датчика $y_v(t) = H_v x(t)$ может решить эту проблему.

Для определения матрицы H_v введем матрицу $D_e = \begin{pmatrix} D \\ 0 \end{pmatrix}$ и матрицу D_e^0 максимального ранга такую, что $D_e^0 D_e = 0$. Исходя из структуры матриц $V_0^{(k)}$ и $B^{(k)}$ можно заметить, что условие, которому должна удовлетворять матрица H_v , имеет вид

$$\text{rank}(D^0 H) < \text{rank}(D_e^0 H_0) = \text{rank} \left(D_e^0 \begin{pmatrix} H \\ H_v \end{pmatrix} \right),$$

поскольку это увеличивает шансы удовлетворить условию (4.2), а следовательно, требованиям $R_0 D = 0$ и нечувствительности к возмущению.

Отметим также, что решение многих задач диагностирования существенно упрощается в случае, когда доступны все компоненты вектора состояния системы. В частности, при решении задачи идентификации на основе скользящих наблюдателей здесь удастся существенно ослабить ограничения на исходную систему (см., например, [8]). В этом случае матрица H_v выбирается из условия

$$\text{rank} \begin{pmatrix} H \\ H_v \end{pmatrix} = n,$$

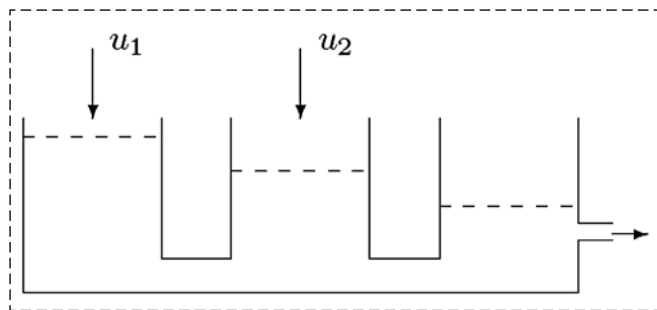
которое обеспечивает доступность всех компонент вектора состояния системы.

5. Пример

Рассмотрим систему управления

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= u_1(t)/\vartheta_1 - b_1(x_1(t) - x_2(t)); \\ \dot{x}_2(t) &= u_2(t)/\vartheta_2 + b_1(x_1(t) - x_2(t)) - b_2(x_2(t) - x_3(t)); \\ \dot{x}_3(t) &= b_2(x_2(t) - x_3(t)) - b_3(x_3(t) - \vartheta_3) + \rho(t); \\ y_1(t) &= x_2(t); \quad y_2(t) = x_3(t).\end{aligned} \quad (5.1)$$

Уравнения (5.1) описывают так называемую трехтанковую систему (см. рисунок), состоящую из трех резервуаров, соединенных между собой трубами. Жидкость поступает в первый и второй танки и выливается из третьего танка. Уровни жидкости в танках обозначены $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $x_3(t)$; b_1 , b_2 и b_3 — коэффициенты, значения которых определяются геометрическими размерами системы.



Трехтанковая система
Three-tank system

Поскольку неизмеряемой является компонента $x_1(t)$, примем $y_v(t) = x_1(t)$, $H_v = (1 \ 0 \ 0)$ и построим соответствующий виртуальный наблюдатель. Для простоты примем $\vartheta_1 = 1$, $\vartheta_2 = 1$, $\vartheta_3 = 0$, $b_1 = b_2 = b_3 = 1$. Приведем матрицы, описывающие систему (5.1):

$$F = \begin{pmatrix} -b_1 & b_1 & 0 \\ b_1 & -b_1 - b_2 & b_2 \\ 0 & b_2 & -b_2 - b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix},$$

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Нетрудно проверить, что условие (2.6) выполняется при $k = 1$, однако при этом не выполняется условие (2.8), поэтому принимаем $k = 2$. Составная матрица $(V^{(2)} \ L^{(2)})$ имеет вид

$$(V^{(2)} \ L^{(2)}) = \begin{pmatrix} -3 & 6 & -4 & 0 & -2 \\ 1 & -4 & 5 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Можно проверить, что с матрицей $(V^{(2)} \ L^{(2)})$ уравнение (2.5) имеет два решения:

$$(R^* \ -J_{*1} \ -J_{*2}) = (1 \ 0 \ 2 \ -1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1),$$

$$\Phi^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$(R^* \ -J_{*1} \ -J_{*2}) = (1 \ 0 \ 3 \ -1 \ 0 \ 1 \ -1 \ 0),$$

$$\Phi^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Первое из них дает модель

$$\begin{aligned} \dot{x}_{v1}(t) &= x_{v2}(t) - 2y_1(t) + y_2(t) + u_2(t); \\ \dot{x}_{v2}(t) &= -y_v(t) + y_1(t) = -x_{v2}(t) + y_1(t) + u_1(t); \\ y_*(t) &= x_{v1}(t); \quad y_v(t) = x_{v2}(t) \end{aligned}$$

с матрицами $F^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, $H^* = (1 \ 0)$, $H_{*v} = (0 \ 1)$

и $Q = 0$. Нетрудно видеть, что пара (F^*, H^*) наблюдаема, поэтому существует такая матрица J_v , что $(F^* - J_v H^*)$ устойчива. Можно принять $J_v = (2 \ 1)^T$, что дает $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = -2$. Соответствующий наблюдатель описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_{v1}(t) &= x_{v2}(t) + y_2(t) - 2y_*(t) + u_2(t); \\ \dot{x}_{v2}(t) &= -x_{v2}(t) + 2y_1(t) - y_*(t) + u_1(t); \\ y_*(t) &= x_{v1}(t); \quad y_v(t) = x_{v2}(t). \end{aligned}$$

Второе решение дает модель

$$\begin{aligned} \dot{x}_{v1}(t) &= x_{v2}(t) - 3y_1(t) + y_2(t) + u_2(t); \\ \dot{x}_{v2}(t) &= -y_1(t) + y_2(t) + u_1(t) + u_2(t); \\ y_*(t) &= x_{v1}(t); \quad y_v(t) = x_{v2}(t) - y_1(t) \end{aligned}$$

с матрицами $F^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $H^* = (1 \ 0)$, $H_{*v} = (0 \ 1)$

и $Q = (-1 \ 0)$. Здесь можно принять $\lambda_1 = \lambda_2 = -1$, что дает $J_v = (2 \ 1)^T$. Наблюдатель имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_{v1}(t) &= x_{v2}(t) - y_1(t) + y_2(t) - 2y_*(t) + u_2(t); \\ \dot{x}_{v2}(t) &= y_2(t) - y_*(t) + u_1(t) + u_2(t); \\ y_*(t) &= x_{v1}(t); \quad y_v(t) = x_{v2}(t) - y_1(t). \end{aligned}$$

Заключение

В работе предложен метод построения виртуальных датчиков в технических системах, описываемых линейными моделями. На основе наблюдателей Льюенбергера получены соотношения, позволяющие построить датчики минимальной размерности, оценивающие заданные компоненты вектора состояния диагностируемой системы. Синтезированные виртуальные датчики дают возможность в ряде случаев не только уменьшить сложность средств диагностирования и повысить глубину диагностирования, но и рассмотреть задачи, которые без использования таких датчиков не могли быть решены.

Список литературы

1. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. **Шумский А. Е., Жирабок А. Н., Гаджиев Ч.** Диагностирование и отказоустойчивое управление динамическими системами. Электронное издание. Владивосток: ДВФУ, 2016. 178 с. URL: <http://elibr.dvfu.ru/vital/access/manager/Repository/feFu:4053>
3. **Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M.** Diagnosis and fault tolerant control. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
4. **Witczak M.** Fault diagnosis and fault tolerant control strategies for nonlinear systems. Berlin: Springer, 2014.
5. **Квакернаак Х., Сиван Р.** Линейные оптимальные системы управления. М.: Наука, 1977.

6. **Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е.** Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // Автоматика и телемеханика. 2020. № 2. С. 18—35.

7. **Жирабок А. Н., Зуев А. В., Бобко Е. Ю., Филатов А. Л.** Решение задачи аккомодации в нелинейных системах с использованием линейных методов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. № 1. С. 21—27.

8. **Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V.** Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers // Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2020. Vol. 30, N. 4. P. 679—688.

Virtual Sensors in the Fault Diagnosis Problem

A. N. Zhirabok^{1,2}, zhirabok@mail.ru, **Kim Chkhun Ir¹**, kim.ci@dvfu.ru,

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,

²Institute of Marine Technology Problems, 690950, Russian Federation

Corresponding author: **Zhirabok A. N.**, Dr. of Sci., Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation, e-mail: zhirabok@mail.ru

Accepted on March 12, 2021

Abstract

The paper is devoted to the problem of fault diagnosis (isolation and identification) in linear dynamic systems under disturbances. The performances of fault diagnosis depend on the sensors which are in the system under diagnosis. To improve the performances, additional sensors can be applied. But sometimes it is impossible to use such sensors; besides they have low reliability. In this paper, we suggest to use so-called virtual sensors instead of additional ones. To obtain such sensors, Luenberger observers can be used. Such an observer is designed in two steps. On the first step, the model of minimal dimension invariant with respect to the disturbances and estimating a predetermined component of the system state vector and some other components of the system state vector is designed. The second components are necessary to provide stability of the observer by means of generating residual and using feedback. Such components are determined during the process of the problem solution which is based on the canonical form of matrices describing the model. On the second step, the feedback matrix is found based on the required quality of transient. To obtain this matrix, eigenvalues are selected and coefficients of the characteristic equation are calculated. The rule to find the predetermined component of the system state vector to be estimated by virtual observer is suggested. Theoretical results are illustrated by practical example of well known three tank system.

Keywords: linear systems, faults, diagnosis, virtual sensors, observers, identification

For citation:

Zhirabok A. N., Kim C. Virtual Sensors in the Fault Diagnosis Problem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 6, pp. 298—303.

DOI: 10.17587/mau.22.298-303

References

1. **Mironovski L. A.** Functional diagnostics of dynamic systems, Moscow—SPb., MGU-GRIF, 1998.
2. **Shumsky A. E., Zhirabok A. N., Gadzhiev Ch.** Diagnostics and fault-tolerant control of dynamic systems, Electronic edition, Vladivostok, Publishing house of FEFU, 2016, 178 p., available at: <http://elibr.dvfu.ru/vital/access/manager/Repository/feFu:4053>.
3. **Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M.** Diagnosis and fault tolerant control, Berlin, Springer-Verlag, 2003.
4. **Witczak M.** Fault diagnosis and fault tolerant control strategies for nonlinear systems, Berlin, Springer, 2014.

5. **Kwakernaak H., Sivan R.** Linear optimal control systems, N. Y., Wiley, 1972.

6. **Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumsky A. Ye.** Diagnosis of linear dynamic systems: an approach based on sliding mode observers, *Avtomatika i telemekhanika*, 2020, no. 2, pp. 18—35.

7. **Zhirabok A. N., Zuev A. V., Bobko E. Yu., Filatov A. L.** Solution of fault accommodation problem in nonlinear systems based on linear methods, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, no. 1, pp. 21—27.

8. **Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V.** Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers, *Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 679—688.