

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ НА ОСНОВЕ СКОЛЬЗЯЩИХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ С ОСЛАБЛЕННЫМИ УСЛОВИЯМИ СУЩЕСТВОВАНИЯ

А. Н. ЖИРАБОК^{1,2}, А. В. ЗУЕВ², В. Ф. ФИЛАРЕТОВ³, А. Е. ШУМСКИЙ¹

¹Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, Россия
E-mail: zhirabok@mail.ru

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 690950, Владивосток, Россия

³Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690914, Владивосток, Россия

Рассматривается задача идентификации дефектов технических систем, описываемых линейными дифференциальными уравнениями, в присутствии возмущений. Для решения задачи используются наблюдатели, работающие в скользящем режиме. Предложен подход, базирующийся на идее построения редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, обладающей избирательной чувствительностью к дефектам и возмущению. Скользящий наблюдатель строится на основе не исходной, а построенной редуцированной системы. Основной целью введения такой модели является ослабление условий существования скользящих наблюдателей по сравнению с известными работами; а кроме того — снижение размерности строящихся скользящих наблюдателей. Эффект ослабления условий достигается за счет того, что модель пониженной размерности может не иметь свойств исходной системы, препятствующих возможности построения для нее скользящего наблюдателя. Изложенные теоретические соображения проиллюстрированы примером.

Ключевые слова: технические системы, дефекты, идентификация, наблюдатели, скользящие режимы

Введение. Действенным средством повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем является функциональное диагностирование (ФД), позволяющее оперативно давать информацию о возникших сбоях и дефектах. Основные методы ФД — обнаружение, локализация и идентификация дефектов [1, 2]. Методом, дающим наибольшую информацию о дефектах, является идентификация. Последние годы для ее реализации активно применяется подход, основанный на наблюдателях, работающих в скользящем режиме и использующих особенности этого режима (СН) [3].

СН применяются для идентификации дефектов в линейных [4—6] и нелинейных [7, 8] системах, для обеспечения отказоустойчивого управления [9], в ряде практических приложений [10, 11]. Во всех таких работах на исходную систему накладывается ряд ограничений, в частности, требуется, чтобы выполнялось так называемое условие согласования, и система была минимально фазовой.

Для ослабления условия согласования предложены методы, использующие СН высокого порядка [12, 13] и каскадное соединение наблюдателей [14], но при этом система должна быть минимально фазовой. В [15] последнее условие ослаблено за счет того, что в выражение для оценки дефекта входит производная величины дефекта, в [16] для этого вводится предположение об ограниченности ошибки оценивания. В [17, 18] требование минимальной фазовости системы ослаблено до условия детектируемости.

Отметим также, что в известных работах СН строятся на основе исходной системы и, следовательно, их размерность совпадает с размерностью этой системы. В настоящей статье предложен метод, позволяющий осуществить дальнейшее ослабление условий согласования,

минимальной фазовости и детектируемости. В его основе лежит идея использования редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, что и позволяет ослабить эти условия. Кроме того, это позволяет уменьшить размерность СН.

Построение редуцированной модели. Рассмотрим систему, описанную линейной моделью

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + L\rho(t), \quad y(t) = Hx(t). \quad (1)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$, $L \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{l \times n}$ — известные постоянные матрицы; $d(t) \in R$ — функция, описывающая дефекты: при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; $\rho(t) \in R^p$ — неизвестная функция времени, описывающая действующие возмущения.

Для решения задачи идентификации функции $d(t)$ в [7] предполагается, что система (1) удовлетворяет следующим условиям: 1) $\text{rank}(H[L \ D]) = \text{rank}([L \ D])$ (условие согласования), 2) все инвариантные нули тройки $(F, [L \ D], H)$ лежат в левой полуплоскости. В [17, 18] эти условия ослаблены — требуется, чтобы система (1) была детектируемой, т.е. ее ненаблюдаемая часть устойчива.

Целью настоящей работы является дальнейшее ослабление этих условий за счет построения СН на основе модели исходной системы пониженной размерности, что дополнительно приводит к понижению размерности наблюдателя. Эффект ослабления условий достигается за счет того, что модель пониженной размерности может не иметь свойств исходной системы, препятствующих возможности построения для нее СН.

Предполагается, что система (1) недетектируема, т.е. $\text{Ker}(V^{(n)}) \neq \emptyset$, где

$$V^{(n)} = \begin{pmatrix} H \\ HF \\ \vdots \\ HF^{n-1} \end{pmatrix},$$

и ее ненаблюдаемая часть неустойчива.

Допущение. $\text{Im}(D) \cap \text{Ker}(V^{(n)}) = \emptyset$.

Обозначим через r_d минимальную сравнительную степень вектора y по отношению к функции $d(t)$, y_* — компонент вектора y , соответствующий r_d , R_* — матрицу такую, что $R_*y(t) = y_*(t)$. Из допущения следует, что $r_d < \infty$ и матрица R_* существует.

Предположим вначале, что возмущение $\rho(t)$ отсутствует, и построим модель системы (1) минимальной размерности с выходом $y_*(t)$:

$$\dot{x}_*(t) = F_*x_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + D_*d(t), \quad y_*(t) = H_*x_*(t), \quad (2)$$

где $x_*(t) \in R^k$, $k < n$, G_* , J_* , D_* — матрицы, подлежащие определению, матрицы F_* и H_* имеют канонический вид:

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

Предполагается также, что существует матрица Φ с условием $x_*(t) = \Phi x(t)$. Известно [6, 19], что матрицы Φ и R_* удовлетворяют условиям

$$\Phi F = F_* \Phi + J_* H, R_* H_* = H \Phi, G_* = \Phi G, D_* = \Phi D. \quad (3)$$

Канонический вид матриц F_* и H_* позволяет получить следующие уравнения для строк матриц Φ и J_* :

$$\Phi_k = R_* H, \Phi_i F = \Phi_{i-1} + J_{*i} H, i = \overline{k, 2}, \Phi_1 F = J_{*1} H. \quad (4)$$

В [6, 19] показано, что эти уравнения могут быть свернуты в

$$R_* H F^k = J_{*k} H F^{k-1} + J_{*(k-1)} H F^{k-2} + \dots + J_{*1} H.$$

Запишем последнее в виде

$$(1 \quad J_{*k} \quad \dots \quad J_{*1}) W^{(k)} = 0, \quad (5)$$

где

$$W^{(k)} = \begin{pmatrix} R_* H F^k \\ H F^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix},$$

и найдем его решение при $k \geq r_d$; далее на основе (3) и (4) вычисляются матрицы, описывающие модель (2).

Дальнейшие построения настоящей работы осуществляются по аналогии с [18]; представим матрицы в (2) в следующем виде:

$$F_* = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{pmatrix}, H_* = (0 \quad 1), G_* = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \end{pmatrix}, J_* = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix}, D_* = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

$$F_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \in R^{(k-1) \times (k-1)}, F_2 = 0 \in R^{(k-1) \times 1},$$

$$F_3 = (0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1) \in R^{1 \times (k-1)}, F_4 = 0;$$

остальные матрицы в (6) имеют соответствующие размеры.

Введем преобразование координат $z = T x_*$ с матрицей $T = \begin{pmatrix} I_{k-1} & A \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, где $I_{k-1} \in R^{(k-1) \times (k-1)}$ — тождественная матрица, $A \in R^{(k-1) \times 1}$ выбирается так, чтобы сделать матрицу $F_1 + A F_3$ устойчивой. Поскольку пара (F_1, F_3) наблюдаема, такая матрица существует, представим ее в виде $A = (a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{k-1})^T$. В результате модель (2) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= \bar{F}_1 z_1(t) + \bar{F}_2 z_2(t) + \bar{G}_1 u(t) + \bar{J}_1 y(t) + \bar{D}_1 d(t), \\ \dot{z}_2(t) &= \bar{F}_3 z_1(t) + \bar{F}_4 z_2(t) + \bar{G}_2 u(t) + \bar{J}_2 y(t) + \bar{D}_2 d(t), \\ y_* &= z_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\bar{F}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & a_1 \\ 1 & 0 & & 0 & a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & a_{k-2} \\ 0 & 0 & \dots & 1 & a_{k-1} \end{pmatrix}, \bar{F}_2 = - \begin{pmatrix} a_1 a_{k-1} \\ a_2 a_{k-1} \\ \vdots \\ a_{k-2} a_{k-1} \\ a_{k-1}^2 \end{pmatrix},$$

$$\bar{F}_3 = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1) \in R^{1 \times (k-1)}, \bar{F}_4 = -a_{k-1}, \bar{G}_1 = G_1 + AG_2, \bar{G}_2 = G_2,$$

$$\bar{J}_1 = J_1 + AJ_2, \bar{J}_2 = J_2, \bar{D}_1 = D_1 + AD_2, \bar{D}_2 = D_2.$$

Отметим, что ключевую роль в модели (7) играет устойчивость матрицы \bar{F}_1 . Согласно [7], это следует из того, что все инвариантные нули тройки $(F, [L \ D], H)$ лежат в левой полуплоскости, по [17, 18] — из детектируемости системы (1), в настоящей работе — из канонического вида матриц F_* и H_* .

Идентификация дефектов

Идентификация в отсутствие возмущений. Поскольку матрица \bar{F}_1 устойчива, существуют симметрические положительно определенные матрицы P и Q такие, что $\bar{F}_1^T P + P \bar{F}_1 = -Q$. По аналогии с [18] СН строится в виде

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_1(t) &= \bar{F}_1 \hat{z}_1(t) + \bar{F}_2 \hat{z}_2(t) + \bar{G}_1 u(t) + \bar{J}_1 y(t) + \bar{K}_1 v(t), \\ \dot{\hat{z}}_2(t) &= \bar{F}_3 \hat{z}_1(t) + \bar{F}_4 \hat{z}_2(t) + \bar{G}_2 u(t) + \bar{J}_2 y(t) + k_2 v(t) + k_3 e_2(t), \\ \bar{y}_* &= \hat{z}_2, \end{aligned} \tag{8}$$

где $e_2(t) = y_*(t) - \bar{y}_*(t)$, $v(t) = \text{sign}(e_2(t))$, $\bar{K}_1 = P^{-1} \bar{F}_3 k_1$, k_1, k_2, k_3 — положительные числа:

$$k_3 > \delta \| \bar{F}_3 \| + \beta \| \bar{D}_2 \|, \quad k_1 > \delta \beta \| P \bar{D}_1 \| / (k_3 - \beta \| \bar{D}_2 \|), \tag{9}$$

$$\beta > \| d(t) \|, \quad \delta = \max \{ \delta_1, \delta_2 \},$$

$$\delta_1 = \frac{\bar{\lambda}(P) \beta \| \bar{D}_1 \| + \| P \bar{K}_1 \|}{\underline{\lambda}(P) \underline{\lambda}(Q)}, \quad \delta_2 = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}(P)}{\underline{\lambda}(P)}} e_1(0),$$

$$e_1(t) = z_1(t) - \bar{z}_1(t).$$

Теорема. Наблюдатель (8) дает оценку функции $d(t)$ в виде $\hat{d}(t) = k_3 D_{*2}^+ \eta(t)$, если $\bar{D}_1 = 0$, и $\hat{d}(t) = D_{*1}^+ (\bar{K}_1 - k_3 A) \eta(t)$ в противном случае, где $D_1^+ = (\bar{D}_1^T \bar{D}_1)^{-1} \bar{D}_1^T$, $D_2^+ = (\bar{D}_2^T \bar{D}_2)^{-1} \bar{D}_2^T$, $\eta(t)$ получена пропусканьем сигнала $v(t)$ через низкочастотный фильтр:

$$\tau \dot{\eta}(t) + \eta(t) = v(t), \tag{10}$$

τ — постоянная времени фильтра.

Доказательство не приводится, поскольку оно практически совпадает с доказательством в [18] с учетом тех упрощений, которые обусловлены каноническим видом матриц F_* и H_* .

Идентификация в присутствии возмущений. Условие $\Phi L = 0$ нечувствительности к возмущению имеет вид $(1 \ J_{*k} \ \dots \ J_{*1}) L^{(k)} = 0$ [6], где

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

Последнее уравнение и (5) дают выражение

$$(1 \ J_{*k} \ \dots \ J_{*1})(W^{(k)} \ L^{(k)}) = 0, \quad (11)$$

решение которого ищется при $k \geq r_d$; дальнейшие действия аналогичны описанным выше.

Пример. Рассмотрим систему управления, описанную уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -x_1(t) + x_2(t) + u(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -x_2(t) + x_4(t) + d(t), \\ \dot{x}_3(t) &= +x_3(t) + x_4(t) + \rho(t), \\ \dot{x}_4(t) &= -x_4(t) + \rho(t), \\ y_1(t) &= x_1(t), \quad y_2(t) = x_4(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Приведем матрицы, описывающие систему:

$$F = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Можно показать, что система недетектируема и

$$V^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

откуда $\text{Ker}(V^{(3)}) = (0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$. Ясно, что $\text{Im}(D) \cap \text{Ker}(V^{(3)}) = \emptyset$, $r_d = 2$, $y_* = y_1$ и $R_* = (1 \ 0)$. Матрицы $W^{(2)}$ и $L^{(2)}$ имеют вид

$$W^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad L^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Нетрудно видеть, что уравнение (11) имеет решение с матрицами $J_{*1} = (-1 \ 1)$, $J_{*2} = (-2 \ 0)$, откуда $\Phi_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$, $\Phi_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$ и $D_* = (0 \ 1)^T$, $G_* = (1 \ 1)^T$. В результате модель (2) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}(t) &= -y_1(t) + y_2(t) + u(t) + d(t), \\ \dot{x}_{*2}(t) &= x_{*1}(t) - 2y_1(t) + u(t), \\ y_*(t) &= x_{*2}(t), \end{aligned}$$

где $x_{*1} = x_1 + x_2$, $x_{*2} = x_1$. Приняв $A = -1$ и $T = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, получим модель (7):

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= -z_1(t) - z_2(t) + y_1(t) + y_2(t) + u(t) + d(t), \\ \dot{z}_2(t) &= z_1(t) + z_2(t) - 2y_1(t) + u(t), \\ y_*(t) &= z_2(t), \end{aligned}$$

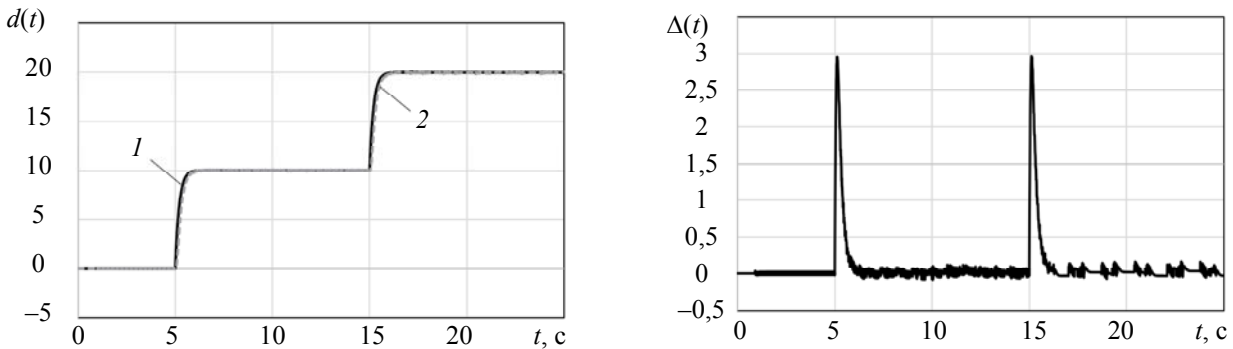
где $z_1 = x_{*1} - x_{*2}$, $z_2 = x_{*2}$. Из вида модели следует, что $\bar{F}_3 = 1$, $\bar{D}_1 = 1$, $\bar{D}_2 = 0$; так как $\bar{F}_1 = -1$, можно принять $P := 1$, откуда $Q = 2$.

СН описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_1(t) &= -\hat{z}_1(t) - \hat{z}_2(t) + y_1(t) + y_2(t) + u(t) + \bar{K}_1 v(t), \\ \dot{\hat{z}}_2(t) &= \hat{z}_1(t) + \hat{z}_2(t) - 2y_1(t) + u(t) + k_2 v(t) + k_3 e_2(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{z}_2(t), \end{aligned} \tag{13}$$

где $e_2(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t)$, $v(t) = \text{sign}(e_2(t))$, $\bar{K}_1 = P^{-1} \bar{F}_3 k_1 = k_1$, $k_1, k_2 > 0$, $k_3 > \delta + \beta$, $\delta = \max\{\beta + k_1, |e_1(0)|\}$, $\beta > \|d(t)\|$. Функция $d(t)$ может быть оценена как $\hat{d}(t) = (k_1 + k_3)\eta(t)$, где $\eta(t)$ получена с помощью фильтра нижних частот (10).

Для моделирования рассмотрим систему (12) и наблюдатель (13) с $u(t) = \sin t$, $k_1 = 100$, $k_2 = 0,1$, $k_3 = 200$, $\beta = 50$, $|e_1(0)| = 0$, $\tau = 0,1$. Результаты моделирования, функции $d(t)$ (кривая 1), ее оценки (2) $\hat{d}(t)$ и ошибки оценивания $\Delta(t) = \hat{d}(t) - d(t)$ приведены на рисунке.



Заключение. В работе решена задача ослабления известных условий (согласования, минимальной фазовости и детектируемости) существования наблюдателей со скользящим режимом работы, применяемых для идентификации дефектов. Показано: эффект ослабления достигается за счет того, что при построении таких наблюдателей используется модель пониженной размерности, которая может не иметь тех свойств, которые присутствуют в исходной системе и препятствуют возможности построения для нее СН. Предложен метод, позволяющий устранить влияние возмущений в динамике системы на результаты идентификации. Анализ влияния шумов измерений на процесс идентификации произведен в [6], анализ запаздываний требует отдельного рассмотрения.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 20-38-70161 и 19-08-00347.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.—СПб: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. Шумский А. Е., Жирабок А. Н. Методы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. Монография. Владивосток: ДВФУ, 2018. 173 с.
3. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.
4. Edwards C., Spurgeon S. On the development of discontinuous observers // Intern. J. Control. 1994. Vol. 59. P. 1211—1229.
5. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer // Intern. J. Control. 2004. Vol. 77. P. 622—629.
6. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // АиТ. 2020. № 2. С. 18—35.
7. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers // Automatica. 2007. Vol. 43. P. 1605—1614.
8. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems // Math. Problems in Eng. 2012. Vol. 2012. ID 451843. P. 1—22.
9. Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // Automatica. 2008. Vol. 44. P. 1859—1866.
10. Chandra K., Alwi H., Edwards C. Fault reconstruction for a quadrotor using an lpv sliding mode observer // Proc. of 9th IFAC Symp. Safeprocess. Paris, France, 2015. P. 374—379.
11. Zhang K., Jiang B., Yan X., Mao Z. Sliding Mode observer based incipient sensor fault detection with application to high-speed railway traction device // ISA Transactions. 2016. Vol. 63. P. 49—59.
12. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. On sliding mode observers for systems with unknown inputs // Intern. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2017. Vol. 21. P. 638—656.
13. Fridman L., Levant A., Davila J. Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes // Intern. J. Syst. Sci. 2007. Vol. 38. P. 773—791.
14. Tan C., Edwards C. Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design // Proc. of American Contr. Conf. St. Louis, USA, 2009. P. 3411—3416.
15. Alwi H., Edwards C., Tan C. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor faults // Automatica. 2009. Vol. 45. P. 1679—1685.
16. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. Nonminimum phase switched systems: HOSM based fault detection and fault identification via Volterra integral equation // Intern. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2014. Vol. 28. P. 1372—1397.
17. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. Robust fault tolerant control desing for nonlinear systems not satisfying matching and minimum phase conditions // Intern. J. Contr., Autom., and Syst. 2020. Vol. 18. P. 1—14.
18. Wang X., Tan C., Zhou D. A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions // Automatica. 2017. Vol. 79. P. 290—295.
19. Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Павлов С. В. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом // АиТ. 2017. № 7. С. 3—21.

Сведения об авторах**Алексей Нилович Жирабок**

— д-р техн. наук, профессор; Дальневосточный федеральный университет, департамент автоматике и робототехники; E-mail: zhirabok@mail.ru

Александр Валерьевич Зуев

— канд. техн. наук, доцент; Институт проблем морских технологий ДВО РАН, лаборатория интеллектуальных систем; зав. лабораторией; E-mail: zuev@dvo.ru

- Владимир Федорович Филаретов** — д-р техн. наук, профессор; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория робототехнических систем; зав. лабораторией; E-mail: Filaretov@inbox.ru
- Алексей Евгеньевич Шумский** — д-р техн. наук, профессор; Дальневосточный федеральный университет, кафедра менеджмента; E-mail: a.e.shumsky@yandex.com

Поступила в редакцию
20.01.2020 г.

Ссылка для цитирования: Жирабок А. Н., Зуев А. В., Филаретов В. Ф., Шумский А. Е. Идентификация дефектов на основе скользящих наблюдателей с ослабленными условиями существования // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 255—263.

FAULT IDENTIFICATION BASED ON SLIDING MODE OBSERVERS WITH RELAXED EXISTENCE CONDITIONS

A. N. Zhirabok^{1,2}, A. V. Zuev², V. F. Filaretov³, A. E. Shumsky¹

¹Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, Russia
E-mail: zhirabok@mail.ru

²Institute of Marine Technology Problems of the RAS, Far Eastern Branch, 690950, Vladivostok, Russia

³Institute of Automation and Control Processes of the RAS, Far Eastern Branch, 690914, Vladivostok, Russia

The problem of fault identification in technical systems described by linear differential equations under disturbances is considered. To solve the problem, sliding mode observers are used. The proposed approach is based on a reduced-order model of the original system selectively sensitive to faults and disturbances. Instead of the original system, the sliding mode observer is constructed based on the reduced-order model. The main purpose of introducing such a model is to weaken the conditions for the existence of sliding observers in comparison with the known works; another purpose is to decrease in the dimension of the constructed sliding observers. The conditions relaxation is achieved since the reduced-order model may not have the properties of the original system, which prevent the possibility of constructing a sliding observer for it. The stated theoretical considerations are illustrated by an example.

Keywords: technical systems, faults, identification, observers, sliding modes

REFERENCES

1. Mironovskiy L.A. *Funktsional'noye diagnostirovaniye dinamicheskikh system* (Functional Diagnostics of Dynamic Systems), Moscow, St. Petersburg, 1998. (in Russ.)
2. Shumsky A.E., Zhirabok A.N. *Metody diagnostirovaniya i otkazoustoychivogo upravleniya dinamicheskimi sistemami* (Methods for Diagnosing and Fault-Tolerant Control of Dynamic Systems), Vladivostok, 2018, 173 p. (in Russ.)
3. Utkin V.I. *Skol'zyashchiye rezhimy i ikh primeneniye v sistemakh s peremennoy strukturoy* (Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems), Moscow, 1974. (in Russ.)
4. Edwards C., Spurgeon S. *Intern. J. Control*, 1994, vol. 59, pp. 1211–1229.
5. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. *Intern. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622–629.
6. Zhirabok A.N., Shumsky A.E., Zuev A.V. *Automation and Remote Control*, 2020, no. 2, pp. 211–225.
7. Yan X., Edwards C. *Automatica*, 2007, vol. 43, pp. 1605–1614.
8. He J., Zhang C. *Math. Problems in Eng.*, 2012, vol. 2012, ID 451843, pp. 1–22.
9. Alwi H., Edwards C. *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1859–1866.
10. Chandra K., Alwi H., Edwards C. *Proc. of 9th IFAC Symp. Safeprocess*, Paris, France, 2015, pp. 374–379.
11. Zhang K., Jiang B., Yan X., Mao Z. *ISA Transactions*, 2016, vol. 63, pp. 49–59.
12. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. *Intern. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2017, vol. 21, pp. 638–656.
13. Fridman L., Levant A., Davila J. *Intern. J. Syst. Sci.*, 2007, vol. 38, pp. 773–791.
14. Tan C., Edwards C. *Proc. of American Contr. Conf.*, St. Louis, USA, 2009, pp. 3411–3416.
15. Alwi H., Edwards C., Tan C. *Automatica*, 2009, vol. 45, pp. 1679–1685.
16. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. *Intern. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2014, vol. 28, pp. 1372–1397.
17. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. *Intern. J. Contr., Autom. and Syst.*, 2020, vol. 18, pp. 1–14.
18. Wang X., Tan C., Zhou D. *Automatica*, 2017, vol. 79, pp. 290–295.
19. Zhirabok A.N., Shumsky A.E., Pavlov S.V. *Automation and Remote Control*, 2017, no. 7, pp. 1173–1188.

Data on authors

- Alexey N. Zhirabok** — Dr. Sci., Professor; Far Eastern Federal University, Department of Automation and Control Processes; E-mail: zhirabok@mail.ru
- Alexander V. Zuev** — PhD, Associate Professor; Institute of Marine Technology Problems of the RAS, Far Eastern Branch, Intelligent System Laboratory; Head of the Laboratory; E-mail: zuev@dvo.ru
- Vladimir V. Filaretov** — Dr. Sci., Professor; Institute of Automation and Control Processes of the RAS, Far Eastern Branch, Robotic System Laboratory; Head of the Laboratory; E-mail: Filaretov@inbox.ru
- Alexey E. Shumsky** — Dr. Sci., Professor; Far Eastern Federal University, Department of management; E-mail: a.e.shumsky@yandex.com

For citation: Zhirabok A. N., Zuev A. V., Filaretov V. F., Shumsky A. E. Fault identification based on sliding mode observers with relaxed existence conditions. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 4. P. 255—263 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-255-263