

Научная статья

УДК 519.7

doi: 10.17223/19988605/73/10

**Метод идентификации дефектов в датчиках с использованием
скользящих наблюдателей высокого порядка****Алексей Нилович Жиравок¹, Александр Валерьевич Зуев²,
Александр Анатольевич Проценко³, Игорь Вячеславович Горностаев⁴,
Анастасия Юрьевна Сердюкова⁵**^{1,5} *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*^{2,3,4} *Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия*² *Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия*¹ *zhirabok@mail.ru*² *alvzuev@yandex.ru*³ *pro293133@gmail.com*⁴ *gornostaev.iv@dvfu.ru*⁵ *serdyukova.au@dvfu.ru*

Аннотация. Рассматривается задача идентификации (определения величины) дефектов в датчиках технических систем, описываемых линейными уравнениями, в присутствии внешних возмущений. Для решения задачи используются наблюдатели, работающие в скользящем режиме, построенные на основе редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, обладающей избирательной чувствительностью по отношению к дефектам и возмущению. Показано, что при выполнении определенных условий существует скользящий режим, который позволяет получить точную оценку величины дефекта.

Ключевые слова: системы; датчики; дефекты; идентификация; скользящие наблюдатели.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 25-19-00590, <https://rscf.ru/project/25-19-00590/>

Для цитирования: Жиравок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А., Горностаев И.В., Сердюкова А.Ю. Метод идентификации дефектов в датчиках с использованием скользящих наблюдателей высокого порядка // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 73. С. 81–89. doi: 10.17223/19988605/73/10

Original article

doi: 10.17223/19988605/73/10

Method of sensor fault identification based on higher-order sliding mode observers**Alexey N. Zhirabok¹, Alexander V. Zuev², Alexander A. Protsenko³,
Igor V. Gornostaev⁴, Anastasia Yu. Serdyukova⁵**^{1,5} *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation*^{2,3,4} *Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Russian Federation*² *Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Russian Federation*¹ *zhirabok@mail.ru*² *alvzuev@yandex.ru*³ *pro293133@gmail.com*

⁴ gornostaev.iv@dvfu.ru⁵ serdyukova.au@dvfu.ru

Abstract. The problem of sensor fault identification in technical systems described by linear equations under the external disturbances is studied. To solve the problem, sliding mode observer is used which is constructed based on the reduced-order model of the initial system. This model is sensitive to the faults and insensitive to the disturbances. It is shown that if some conditions are met, then sliding mode exists which allows obtaining exact estimation of the fault.

Keywords: dynamic systems; sensors; faults; identification; sliding mode observers.

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation № 25-19-00590, <https://rscf.ru/project/25-19-00590/>

For citation: Zhirabok, A.N., Zuev, A.V., Protsenko, A.A., Gornostaev, I.V., Serduykova, A.Yu. (2025) Method of sensor fault identification based on higher-order sliding mode observers. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 73. pp. 81–89. doi: 10.17223/19988605/73/10

Введение

Разнообразные датчики составляют неотъемлемую часть практически любой технической системы. Нередко они являются наименее надежными ее элементами, вследствие чего при появлении в них дефектов датчики могут поставлять искаженную информацию о состоянии системы, что в результате будет приводить к ошибочным реакциям системы управления. Если величину возникших дефектов удастся оценить, эту информацию можно использовать для коррекции искажений и восстановления нормальной работы системы управления.

В настоящее время для оценки (идентификации) величин возникших дефектов активно используются наблюдатели, работающие в скользящем режиме (скользящие наблюдатели) [1–8]. В указанных работах решается задача идентификации для различных классов систем и дефектов, возникающих как в динамике и приводах системы, так и в ее датчиках. Предполагается, что до проведения идентификации решается задача локализации, определяющая, какой датчик неисправен. Для конкретности ниже будем полагать, что искажение показаний датчика описывается неизвестной функцией $d(t)$, которую требуется идентифицировать.

Отметим, что задачи идентификации дефектов в датчиках рассматривались в [2, 7], где было получено только приближенное решение, поскольку итоговое выражение содержало производную $d(t)$. Метод, предложенный в [8], давал точное решение за счет использования специальной системы повышенной размерности, на основе которой строился скользящий наблюдатель. В отличие от этих методов в настоящей работе скользящий наблюдатель строится на основе редуцированной модели исходной системы пониженной размерности, нечувствительной к возмущениям, которая не содержит производной $d(t)$.

Настоящая работа является логическим продолжением статьи [6], где рассматривалась задача идентификации дефектов в датчиках технических систем на основе скользящих наблюдателей. Из [1–6] и аналогичных работ следует, что задача может быть решена при наложении на исходную систему ряда условий, которые далеко не всегда выполняются, что делает невозможным решение задачи идентификации.

Эти условия могут быть в значительной мере ослаблены при использовании так называемых скользящих наблюдателей высокого порядка, рассмотренных в ряде статей [9–12], которые опираются на дифференциатор Леванта [13]. Для реализации этой идеи в статье ставится и решается задача идентификации дефектов в датчиках на основе скользящих наблюдателей высокого порядка. Новизна работы состоит в том, что в отличие от известных работ процедура идентификации нечувствительна к внешним возмущениям и реализуется без наложения условия согласования, что позволяет решить задачу идентификации для более широкого класса систем.

Для этого вначале изложим основные сведения о скользящих наблюдателях высокого порядка на основе работ [9, 10], поскольку подход работ [11, 12] накладывает больше ограничений на исходную систему.

1. Предварительные сведения

Рассмотрим класс систем, описываемых уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + L\rho(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ и $u(t) \in R^m$ – векторы состояния и управления; $y(t) \in R$ – скалярное измерение; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $L \in R^{n \times 1}$ и $C \in R^{1 \times n}$ – известные постоянные матрицы; $\rho(t) \in R$ – неизвестная скалярная функция времени, описывающая действующие на систему возмущения.

Отметим, что для решения рассматриваемой задачи в работах [1–5] на систему (1) накладывалось условие согласования $\text{rank}(CL) = \text{rank}(L)$, которое снимается в статьях [9–12]. Введем несколько необходимых для дальнейшего изложения понятий [9, 10].

Напомним, что матрицей наблюдаемости системы (1) называется матрица

$$P = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что пара (C, A) наблюдаема, т.е. $\text{rank}(P) = n$. Известно, что в этом случае существует такая матрица K , что $\tilde{A} = A - KC$ будет устойчивой. Предполагается также, что система (1) является минимально-фазовой, т.е. инвариантные нули тройки (A, C, L) имеют отрицательные вещественные части. Последнее означает, что нули передаточной функции системы (1) являются устойчивыми.

Относительной степенью системы (1) для функции $\rho(t)$ называется число n_1 такое, что

$$CA^j L = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_1 - 2, \quad CA^{n-1} L \neq 0.$$

Известно, что $n_1 \leq n$, и соответствующим преобразованием координат систему можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t) + L_1\rho(t), \\ \dot{x}_2(t) &= A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t), \\ y(t) &= C_1x_1(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $A_{11} \in R^{n_1 \times n_1}$, $A_{12} \in R^{n_1 \times (n-n_1)}$, $L_1 \in R^{n_1 \times 1}$, $C_1 \in R^{1 \times n_1}$, при этом

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_{n_1} \end{pmatrix}, \quad A_{12} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta_{n_1+1} & \beta_{n_1+2} & \dots & \beta_n \end{pmatrix}, \quad L_1 = (0 \quad \dots \quad 0 \quad q)^T, \quad q \neq 0,$$

где β_1, \dots, β_n – некоторые константы; при $n_1 = n$ подсистема с вектором x_2 отсутствует.

Рассмотрим вначале случай $n_1 = n$, полагая, что неизвестная функция $\rho(t)$ ограничена вместе со своими p производными: $\rho(t) \leq \rho_0$, $\rho^{(i)}(t) \leq \rho_0$, $i = 1, 2, \dots, p$. Кроме того, предполагается, что p -я производная удовлетворяет условию Липшица с константой ρ_1 , т.е. $|\rho^{(p)}(t) - \rho^{(p)}(t')| \leq \rho_1 |t - t'|$.

Для оценки величины функции $\rho(t)$ строятся два наблюдателя, первый из которых представляет собой стандартный наблюдатель Люенбергера полного порядка:

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + S(y(t) - Cz(t)), \quad z \in R^n. \quad (3)$$

Второй – это скользящий наблюдатель высокого порядка [13], имеющий следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 = w_1 &= -\alpha_{n+p+1} M^{1/(n+p+1)} |v_1 - y + Cz|^{(n+p)/(n+p+1)} \text{sign}(v_1 - y + Cz) + v_2, \\ \dot{v}_2 = w_2 &= -\alpha_{n+p} M^{1/(n+p)} |v_2 - w_1|^{(n+p-1)/(n+p)} \text{sign}(v_2 - w_1) + v_3, \\ &\vdots \\ \dot{v}_n = w_n &= -\alpha_{p+2} M^{1/(p+2)} |v_n - w_{n-1}|^{(p+1)/(p+2)} \text{sign}(v_n - w_{n-1}) + v_{n-1}, \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_{n+p} = w_{n+p} &= -\alpha_2 M^{1/2} |v_{n+p-1} - w_{n+p-2}|^{1/2} \text{sign}(v_{n+p-1} - w_{n+p-2}) + v_{n+p}, \\ \dot{v}_{n+p+1} &= -\alpha_1 M \text{sign}(v_{n+p+1} - w_{n+p}),\end{aligned}$$

где M – достаточно большая константа, константы α_i выбираются достаточно большими согласно рекомендациям [11]; в частности, там предложено $\alpha_1 = 1,1$, $\alpha_2 = 1,5$, $\alpha_3 = 2$, $\alpha_4 = 3$, $\alpha_5 = 5$, $\alpha_6 = 8$.

Теорема [10]. Функция $\rho(t)$ может быть оценена в виде:

$$\hat{\rho}(t) = \frac{1}{q} (v_{n+1} + (b_1 v_1 + b_2 v_2 + \dots + b_n v_n)), \quad (5)$$

где b_1, b_2, \dots, b_n – коэффициенты характеристического уравнения матрицы $A - KC$:

$$\det(A - KC - sI) = (-1)^n (s^n - b_n s^{n-1} - \dots - b_1).$$

В [10] доказывается, что при наложенных на систему (1) ограничениях и соответствующем выборе констант M и α_i оценка (5) будет точной после окончания переходного процесса за конечное время. Дополнительно показывается, что если в измерениях присутствует шум с максимальной амплитудой ε , то величина ошибки оценивания функции $\rho(t)$ имеет порядок $\varepsilon^{(p+1)/(n+p+1)}$.

В случае $n_1 < n$ при прежних ограничениях на неизвестную функцию $\rho(t)$ ее оценка может быть получена аналогичным образом путем замены размерности n в формулах (4) и (5) на n_1 .

В простейшем частном случае, когда $n = 1$, система (1) имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= ax(t) + bu(t) + q\rho(t), \\ y(t) &= x(t),\end{aligned}$$

и неизвестная функция $\rho(t)$ удовлетворяет условию Липшица, т.е. $p = 0$, получаем:

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= az(t) + bu(t) + K(x(t) - z(t)), \\ \dot{v}_1 = w_1 &= -1,5M^{1/2} |v_1 - x + z|^{1/2} \text{sign}(v_1 - x + z) + v_2, \\ \dot{v}_2 &= -1,1M \text{sign}(v_2 - w_1).\end{aligned}$$

Тогда при $M > |l| \rho_0$ оценка функции $\rho(t)$ имеет вид:

$$\hat{\rho}(t) = \frac{1}{q} (v_2 + (a - K)v_1), \quad K > |a|.$$

2. Построение редуцированной модели

Требование скалярности измерения в модели (1) является недостатком подхода [9, 10], ограничивающим возможности его применения. Этот недостаток, однако, может быть преодолен путем анализа не исходной системы, а ее редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели, которая всегда может быть построена так, чтобы быть чувствительной к дефектам, подлежащим оцениванию. Для изложения этой идеи рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + L\rho(t), \\ y(t) &= Hx(t) + \sum_{j=1}^l D_j d_j(t).\end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и измерений; $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $L \in R^{n \times q}$ и $H \in R^{l \times n}$ – известные постоянные матрицы; $\rho(t) \in R^c$ – неизвестная функция времени, описывающая действующие на систему возмущения; $d_i(t) \in R$ – функция, описывающая дефекты в i -м датчике: при их отсутствии $d_i(t) = 0$, при появлении дефекта $d_i(t)$ становится неизвестной функцией времени, $i = 1, 2, \dots, l$; матрицы D_1, \dots, D_l связывают дефекты с соответствующими компонентами вектора измерений: $D_1 = (1 \ 0 \ \dots \ 0)^T$, \dots , $D_l = (0 \ 0 \ \dots \ 1)^T$. Предполагается, что каждая функция $d_i(t)$ удовлетворяет условию Липшица с некоторой константой.

Для простоты рассмотрим случай, когда дефекты возможны только в одном датчике с соответствующими элементами D и $d(t)$. Требуется оценить функцию $d(t)$ без предположения о минимальной фазовости системы (6).

Редуцированная модель системы (6), нечувствительная к возмущениям, описывается уравнением

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= F_*x_*(t) + G_*u(t) + J_*Hx(t); \\ y_*(t) &= H_*x_*(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $x_* \in R^k$ – вектор состояния размерности $k < n$, матрицы F_* и H_* размеров $k \times k$ и $1 \times k$ соответственно имеют канонический вид:

$$F_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad H_* = (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0). \quad (8)$$

В отличие от системы (6) и строящегося ниже наблюдателя, модель (7) является виртуальным объектом; фактически она представляет собой часть системы (6). Слагаемое $J_*Hx(t)$ использовано вместо $J_*y(t)$ для возможности учета дефектов в датчиках.

Отметим, что для применения методов работ [1–6] к системе (7) требуется выполнение условия $\text{rank}(H_*J_*D) = \text{rank}(J_*D)$ или равенства $PJ_*D = (QH_*)^T$ для некоторой матрицы Q и симметрической положительно определенной матрицы P . Первое, в частности, означает, что дефект должен входить только в первое уравнение системы (7), которое формирует ее выход y_* , второе также носит ограничительный характер, что делает невозможным применение этих методов во многих случаях. Описанный в предыдущем разделе подход не предполагает использования этих ограничений.

Напомним [6], что постоянные матрицы G_* и J_* определяются на основе решения уравнения

$$(N \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})(V^{(k)} \ B^{(k)}) = 0, \quad (9)$$

где

$$V^{(k)} = \begin{pmatrix} D^0 HF^k \\ HF^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}, \quad B^{(k)} = \begin{pmatrix} D^0 HL & D^0 HFL & D^0 HF^2L & \dots & D^0 HF^{k-1}L \\ 0 & HL & HFL & \dots & HF^{k-2}L \\ 0 & 0 & HL & \dots & HF^{k-3}L \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Решая уравнение (9) с минимальной размерностью k , начиная с $k = 1$, определяем строку $(N \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})$. Далее из соотношений

$$R_* = ND^0, \quad \Phi_1 = R_*H, \quad \Phi_1F = \Phi_2 + J_{*1}H, \quad \Phi_iF = \Phi_{i+1} + J_{*i}H, \quad i = \overline{2, k-1}, \quad \Phi_kF = J_{*k}H,$$

где D^0 – матрица максимального ранга такая, что $D^0D = 0$, определяются строки вспомогательной матрицы Φ и находится матрица $G_* = \Phi G$. Поскольку $y(t) = Hx(t) + Dd(t)$, то в модели (7) слагаемое $J_*Hx(t)$ заменяется на $J_*y(t) - J_*Dd(t)$. Для простоты предположим, что вектор J_*D содержит только одну ненулевую компоненту, равную q .

3. Решение задачи

Сравнивая модель (7) с системами (1) и (2), можно сделать вывод, что в качестве системы (1), для которой решается задача оценивания неизвестной функции, может быть использована модель (7) с матрицами $A = F_*$, $B = (G_* \ J_*)$, $L = -J_*D$, $C = H_*$ и переменными $u(t) := \begin{pmatrix} u(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$, $y(t) := y_*(t)$ и $\rho(t) := d(t)$.

Нетрудно проверить, что матрица наблюдаемости модели (7) представляет собой единичную матрицу, поэтому модель наблюдаема. Будем предполагать, что матрица J_*D удовлетворяет следующему условию: комплексная частота s , при которой ранг матрицы Розенброка

$$R = \begin{pmatrix} sI - F_* & J_*D \\ H_* & 0 \end{pmatrix}$$

становится меньше $k + 1$, имеет отрицательную вещественную часть, т.е. система (7) минимально фазовая.

Наблюдатель (3) в нашем случае принимает вид:

$$\dot{z}(t) = F_*z(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + K(R_*y - y_*), \quad z \in R^k. \quad (10)$$

Уравнения (4), описывающие скользящий наблюдатель, сохраняют свой вид с заменой в первом уравнении выражения $v_1 - y + Cz$ на $v_1 - y_* + H_*z$. Значение числа n_1 совпадает с номером компоненты вектора состояния модели (7), в которую входит функция $d(t)$.

С учетом того, что матрица K представляет собой столбец $K = (k_1 \ k_2 \ \dots \ k_k)^T$, а F_* и H_* заданы в канонической форме (8), матрица $A - KC$ принимает вид:

$$F_* - KH_* = \begin{pmatrix} -k_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ -k_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -k_k & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Ее характеристическое уравнение имеет вид:

$$\det(F_* - KH_* - sI) = (-1)^k (s^k + k_1s^{k-1} + \dots + k_k).$$

Отсюда по аналогии с (5) получаем формулу для оценки функции $d(t)$:

$$\hat{d}(t) = \frac{1}{q} (v_{n+1} + (k_k v_1 + k_{k-1} v_2 + \dots + k_1 v_n)).$$

4. Пример

Рассмотрим линейризованную модель трехбакового объекта, приведенную в [6] и описываемую уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\gamma_1(x_1 - x_2) + \gamma_2 u_1, \\ \dot{x}_2 &= \gamma_1(x_1 - x_2) - \gamma_3(x_2 - x_3) + \gamma_4 u_2, \\ \dot{x}_3 &= \gamma_3(x_2 - x_3) - \gamma_5 x_3, \\ y_1 &= x_1 + d, \quad y_2 = x_3, \end{aligned}$$

где коэффициенты $\gamma_1 \div \gamma_5$ зависят от конструктивных особенностей объекта, $x_1 \div x_3$ – уровни жидкости в баках. В отличие от работы [6] будем полагать, что измеряются уровни в первом и третьем баках. Для простоты примем $L = 0$, а также $\gamma_1 = \dots = \gamma_5 = 1$, что дает следующие матрицы:

$$F = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим дефект в первом датчике, для которого $D^0 = (0 \ 1)$. Нетрудно проверить, что при $k = 1$ уравнение (9) не имеет решения, примем $k = 2$:

$$(N \quad -J_{*1} \quad -J_{*2}) \begin{pmatrix} 1 & -4 & 5 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 0,$$

что дает $N=1$, $J_{*1}=(0 \quad -4)$, $J_{*2}=(1 \quad -3)$. В результате

$$R_*=(0 \quad 1), \quad \Phi=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}, \quad G_*=\Phi G=\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_*=-J_*D=\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad q=-1.$$

Модель (7) принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1} &= x_{*2} - 4y_2, \\ \dot{x}_{*2} &= y_1 - 3y_2 + u_2 - d, \\ y_* &= x_{*1} = y_2. \end{aligned}$$

Рассмотрим матрицу Розенброка этой модели

$$R=\begin{pmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Нетрудно видеть, что она невырождена, т.е. построенная модель минимально фазовая.

Поскольку $J_*D=\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, то $n_1=k=2$; примем $K=\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ и построим наблюдатель Люенбергера (10):

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 - 4y_2 + 2(y_2 - y_*) = z_2 - 2y_2 - 2y_*, \\ \dot{z}_2 &= y_1 - 3y_2 + u_2 + (y_2 - y_*) = y_1 - 2y_2 - y_* + u_2, \\ y_* &= z_1. \end{aligned}$$

Так как функция $d(t)$ удовлетворяет условию Липшица, принимаем $p=0$. Скользящий наблюдатель при $\alpha_1=1,1$, $\alpha_2=1,5$, $\alpha_3=2$ принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= w_1 = -2M^{1/3} |v_1 - y_2 + z_{*1}|^{2/3} \text{sign}(v_1 - y_2 + z_{*1}) + v_2, \\ \dot{v}_2 &= w_2 = -1,5M^{1/2} |v_2 - w_1|^{1/2} \text{sign}(v_2 - w_1) + v_3, \\ \dot{v}_3 &= -1,1M \text{sign}(v_3 - w_2), \\ M &> 2\|d_1(t)\|. \end{aligned}$$

Найдем коэффициенты характеристического уравнения матрицы $F_* - KH_*$:

$$F_* - KH_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$\det(sI - (F_* - KH_*)) = \det\begin{pmatrix} s+2 & -1 \\ 1 & s \end{pmatrix} = s^2 + 2s + 1,$$

откуда $b_1=1$, $b_2=2$. В результате оценка функции $d(t)$ принимает вид:

$$\hat{d}(t) = -(v_3 + v_1 + 2v_2).$$

Отметим, что поскольку функция, описывающая дефект, входит во второе уравнение, методы идентификации, рассмотренные в работах [1–5], в данном случае неприменимы.

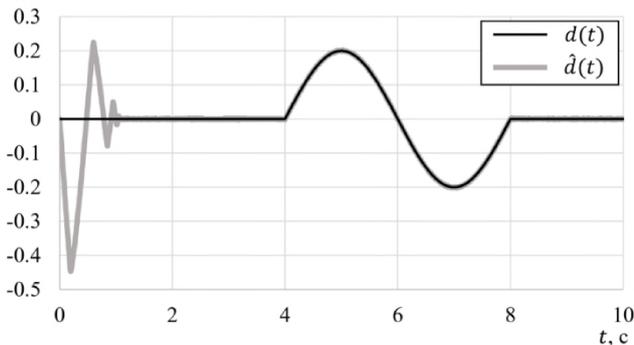


Рис. 1. Результат идентификации функции $d(t)$
Fig. 1. Результат идентификации функции $d(t)$

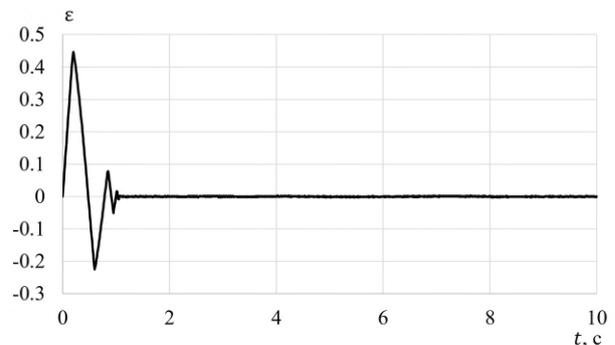


Рис. 2. Ошибка идентификации функции $d(t)$
Fig. 2. Ошибка идентификации функции $d(t)$

В ходе моделирования использовались следующие управляющие воздействия: $u_1(t) = \sin(t)$, $u_2(t) = \sin(0,3t)$. Дефект имитировался появлением сигнала $d(t) = 0,2 \sin(\pi t / 2 - 2\pi)$ на интервале времени 4–8 с. Были приняты следующие начальные условия: $x_1(0) = 0,2$, $x_2(0) = 0,05$, $x_3(0) = 0,02$.

На рис. 1 представлен график оценки функции $d(t)$, на рис. 2 – график ошибки идентификации $\varepsilon(t) = d(t) - \hat{d}(t)$; видно, что она не превышает 1%. Из рисунков видно, что построенные наблюдатели обеспечивают точную оценку величины дефекта после окончания переходного процесса за конечное время.

Заключение

В работе была поставлена и решена задача построения скользящих наблюдателей высокого порядка для идентификации дефектов в датчиках технических систем, описываемых линейными моделями. Задача решается на основе редуцированной (имеющую меньшую размерность) модели исходной системы, нечувствительной к возмущениям. Это позволило уменьшить сложность средств идентификации и ослабить ограничения, накладываемые на исходную систему, для решения поставленной задачи.

Список источников

1. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation // *Automatica*. 2000. V. 36. P. 541–553.
2. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers // *Automatica*. 2007. V. 43. P. 1605–1614. doi: 10.1016/j.automatica.2007.02.008
3. Keijzer T., Ferrari R. Threshold design for fault detection with first order sliding mode observers // *Automatica*. 2022. V. 146. Art. 110600. doi: 10.1016/j.automatica.2022.110600
4. Hamdi H., Rodrigues M., Rabaout B., Braiek N. A fault estimation and fault tolerant control based sliding mode observer for LPV descriptor systems with time delay // *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2021. V. 31. P. 247–258.
5. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Сергиенко О., Шумский А.Е. Идентификация дефектов в нелинейных динамических системах и их датчиках на основе скользящих наблюдателей // *Автоматика и телемеханика*. 2022. № 2. С. 63–89.
6. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Идентификация дефектов в датчиках технических систем с использованием скользящих наблюдателей // *Измерительная техника*. 2019. № 10. С. 21–28. doi: 10.1007/s11018-020-01707-1
7. Kalsi K., Hui S., Zak S. Unknown input and sensor fault estimation using sliding-mode observers // *Proceedings 2011 ACC, San Francisco*. 2011. P. 1364–1369.
8. Tan C., Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults // *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2003. V. 13. P. 443–463.
9. Fridman L., Levant A., Davida J. High-order sliding-mode observation and identification for linear systems with unknown inputs // *Proceedings 45th IEEE Conference Decision & Control*. 2006. P. 5567–5572.
10. Fridman L., Levant A., Davida J. Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes // *Int. J. Systems Science*. 2007. V. 38. P. 773–791.
11. Floquet T., Barbot J.-P. A Canonical form for the design of unknown input sliding mode observer // *Advanced in Variable Structure / eds. C. Edwards et al. Springer Verlag*, 2006. P. 217–292.
12. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. On sliding mode observers for systems with unknown inputs // *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*. 2007. V. 21. P. 638–656.
13. Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output feedback control // *Int. J. Control*. 2003. V. 76. P. 924–941.

References

1. Edwards, C., Spurgeon, S. & Patton, R. (2000) Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*. 36. pp. 541–553.
2. Yan, X. & Edwards, C. (2007) Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers. *Automatica*. 43. pp. 1605–1614. doi: 10.1016/j.automatica.2007.02.008
3. Keijzer, T. & Ferrari, R. (2022) Threshold design for fault detection with first order sliding mode observers. *Automatica*. 146. Art. 110600. doi: 10.1016/j.automatica.2022.110600
4. Hamdi, H., Rodrigues, M., Rabaout, B. & Braiek, N. (2021) A fault estimation and fault tolerant control based sliding mode observer for LPV descriptor systems with time delay. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 31. pp. 247–258.
5. Zhirabok, A., Zuev, A., Sergienko, O. & Shumsky, A. (2022) Identification of faults in nonlinear dynamical systems and their sensors based on sliding mode observers. *Automation and Remote Control*. 83(2). pp. 214–236.
6. Zhirabok, A., Zuev, A. & Shumsky, A. (2020) Identification of Faults in the Sensors of Technical Systems with the Use of Sliding Mode observers. *Measurement Techniques*. 62. pp. 869–878. doi: 10.1007/s11018-020-01707-1

7. Kalsi, K., Hui, S. & Zak, S. (2011) Unknown input and sensor fault estimation using sliding-mode observers. *Proceedings of the 2011 ACC*, San Francisco. pp. 1364–1369.
8. Tan, C. & Edwards, C. (2003) Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 13. pp. 443–463.
9. Fridman, L., Levant, A. & Davida, J. (2006) High-order sliding-mode observation and identification for linear systems with unknown inputs. *Proceedings of the 45th IEEE Conference Decision & Control*. pp. 5567–5572.
10. Fridman, L., Levant, A. & Davida, J. (2007) Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes. *International Journal of Systems Science*. 38. pp. 773–791.
11. Floquet, T. & Barbot, J.-P. (2006) A Canonical Form for the design of unknown input sliding mode observer. In: Edwards, C. et al. (eds) *Advanced in Variable Structure*. Springer Verlag. pp. 217–292.
12. Floquet, T., Edwards, C. & Spurgeon, S. (2007) On sliding mode observers for systems with unknown inputs. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 21. pp. 638–656.
13. Levant, A. (2003) Higher-order sliding modes, differentiation and output feedback control. *International Journal of Control*. 76. pp. 924–941.

Информация об авторах:

Жи́рабок Алексей Нилович – профессор, доктор технических наук, профессор департамента автоматике и робототехники Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия). E-mail: zhirabok@mail.ru

Зуев Александр Валерьевич – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем морских технологий ДВО РАН; ведущий научный сотрудник Института автоматике и процессов управления ДВО РАН (Владивосток, Россия). E-mail: alvzuev@yandex.ru

Проценко Александр Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем морских технологий ДВО РАН (Владивосток, Россия). E-mail: pro293133@gmail.com

Горностаев Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем морских технологий ДВО РАН (Владивосток, Россия). E-mail: gornostaev.iv@dvfu.ru

Сердюкова Анастасия Юрьевна – студент Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия). E-mail: serdyukova.au@dvfu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Zhirabok Alexey N. (Professor, Doctor of Technical Sciences, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: zhirabok@mail.ru.

Zuev Alexander V. (Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of RAS; Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: alvzuev@yandex.ru.

Protsenko Alexander A. (Candidate of Technical Sciences, Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: pro293133@gmail.com.

Gornostaev Igor Vyacheslavovic (Candidate of Technical Sciences, Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: gornostaev.iv@dvfu.ru

Serdyukova Anastasia Yu. (Student of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: serdyukova.au@dvfu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 29.08.2025; принята к публикации 02.12.2025

Received 29.08.2025; accepted for publication 02.12.2025