

Научная статья
УДК 519.7
doi: 10.17223/19988605/74/10

Метод идентификации дефектов в нестационарных динамических системах

Алексей Александрович Кабанов¹, Алексей Нилович Жиравок²,
Александр Валерьевич Зуев³, Александр Анатольевич Проценко⁴

¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

^{3,4} Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

³ Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия

¹ kabanov@sensu.ru

² zhirabok@mail.ru

³ alvzuev@yandex.ru

⁴ pro293133@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача оценивания (идентификации) величин дефектов в линейных нестационарных системах на основе методов оптимального управления. Для решения задачи строится банк наблюдателей, каждый из которых чувствителен к одной группе дефектов и нечувствителен к другой. Каждый наблюдатель дает суммарную оценку величин дефектов той группы, к которой он чувствителен. При выполнении определенных условий путем решения системы алгебраических уравнений можно найти оценку величины каждого дефекта. Теоретические положения иллюстрируются практическим примером.

Ключевые слова: динамические системы; редуцированная модель; дефекты; оценивание; методы оптимального управления.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 25-29-00634, <https://rscf.ru/project/25-29-00634/>

Для цитирования: Кабанов А.А., Жиравок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А. Метод идентификации дефектов в нестационарных динамических системах // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2026. № 74. С. 107–114. doi: 10.17223/19988605/74/10

Original article
doi: 10.17223/19988605/74/10

Method of fault identification in non-stationary dynamic systems

Alexey A. Kabanov¹, Alexey N. Zhirabok²,
Alexander V. Zuev³, Alexander A. Protsenko⁴

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

^{3,4} Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

³ Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

¹ kabanov@sensu.ru

² zhirabok@mail.ru

³ alvzuev@yandex.ru

⁴ pro293133@gmail.com

Abstract. The problem of fault estimation in linear non-stationary systems based on the methods of optimal control is studied. To solve the problem, a bank of observers is sensitive to some group of faults and insensitive to others. Each

observer provides total estimate of faults to which it is sensitive. The estimate of every fault is a result of the algebraic equation solution. The theoretical results are illustrated by practical example.

Keywords: dynamic systems; reduced-order model; faults; estimation; methods of optimal control.

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation № 25-29-00634, <https://rscf.ru/project/25-29-00634/>

For citation: Kabanov, A.A., Zhirabok, A.N., Zuev, A.V., Protsenko, A.A. (2026) Method of fault identification in non-stationary dynamic systems. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 74. pp. 107–114. doi: 10.17223/19988605/74/10

Введение

Настоящая статья логически продолжает работы [1, 2] в которых решалась задача идентификации (оценивания) величин дефектов в системах, описываемых линейными стационарными моделями. Популярным средством решения этой задачи являются наблюдатели, работающие в скользящем режиме [3–9]. Использование таких наблюдателей требует наличия высокочастотных переключений, что в реальных системах управления достаточно трудно обеспечить. Подход, предложенный в [1, 2] и основанный на методах оптимального управления, характерен тем, что он свободен от указанного недостатка. В статье этот подход расширен на нестационарные управляемые динамические системы и одновременную оценку величин нескольких возможных дефектов. В его основе лежит преобразование исходной системы к так называемой редуцированной модели минимальной размерности, дополнительно он обладает избирательной нечувствительностью к различным дефектам. На основе редуцированной модели строится вспомогательная система, и для нее путем построения специального наблюдателя решается задача оптимального управления, что позволяет найти оценки величин дефектов, возникших в системе. Полученные оценки могут быть использованы для коррекции возникших дефектов с целью получения свойства отказоустойчивости.

1. Постановка задачи

Рассмотрим нестационарную динамическую систему, описываемую математической моделью

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F(t)x(t) + G(t)u(t) + \sum_{i=1}^p D_i d_i(t) + L\rho(t), \\ y(t) &= Hx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и выхода; $F(t) \in R^{n \times n}$ и $G(t) \in R^{n \times m}$ – матричные функции с известными законами изменения во времени, мы предполагаем, что функция $F(t)$ дифференцируема; $D_1, \dots, D_p \in R^{n \times 1}$ и $H \in R^{l \times n}$ – постоянные матрицы; функция $d_i(t) \in R$ описывает i -й дефект: при его отсутствии $d_i(t) = 0$, при появлении $d_i(t)$ представляет собой неизвестную функцию времени; матрица D_i указывает, где появился этот дефект; $\rho(t) \in R^P$ описывает действующие на систему возмущения и также предполагается неизвестной. Для простоты предположим вначале, что $L = 0$.

Требуется построить банк (множество) редуцированных моделей, а также вспомогательных систем и наблюдателей, с помощью которых на основе методов теории оптимального управления могут быть найдены оценки величин дефектов, возникших в системе.

2. Построение редуцированной модели

Приведем метод построения модели минимальной размерности, нечувствительной к первому дефекту. Если $x_* \in R^k$, $k < n$, – вектор состояния этой модели, то предполагается, что когда дефектов нет, справедливо равенство

$$x_*(t) = \Phi(t)x(t), \quad (2)$$

где подлежащая определению функция $\Phi(t)$ предполагается дифференцируемой, а также что функция $\dot{\Phi}(t)x(t)$ представима через переменные $x_*(t)$ и $y(t)$, т.е. для всех $t \geq 0$ справедливо равенство

$$\dot{\Phi}(t)x(t) = \delta(x_*(t), y(t), t) \quad (3)$$

для некоторой функции δ . Уравнения, описывающие модель, имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= F_*x_*(t) + G_*(t)u(t) + J_*(t)y(t) + \delta(x_*(t), y(t), t) + D_0(t)d_0(t), \\ y_*(t) &= H_*x_*(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где F_* , $G_*(t)$, $J_*(t)$ и H_* – подлежащие определению матрицы. Слагаемое $D_0(t)d_0(t)$ учитывает, что модель (4) может иметь чувствительность к некоторым другим дефектам.

Характерно, что матрица F_* постоянна, чем разрабатываемый подход отличается от [3] и аналогичных работ. В этих работах наблюдатели, как и система (1), являются нестационарными, что заметно усложняет дальнейшие действия. Таким образом, в нашем подходе получается, что модель для нестационарной линейной системы будет нелинейной стационарной.

Естественно предполагать, что если дефектов нет, то $y_*(t) = R_*y(t)$ для подлежащей определению матрицы R_* . Как и в [1, 2], доказывается, что выполняются равенства

$$\Phi(t)F(t) = F_*\Phi(t) + J_*(t)H, \quad R_*H = H_*\Phi(t), \quad G_*(t) = \Phi(t)G. \quad (5)$$

Матрицы F_* и H_* по предположению имеют канонический вид:

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

Из принятого вида этих матриц из первого соотношения в (5) получаются следующие уравнения:

$$\Phi_1 = R_*H, \quad \Phi_i(t)F(t) = \Phi_{i+1}(t) + J_{*i}(t)H, \quad i = \overline{2, k}, \quad \Phi_k(t)F(t) = J_{*k}(t)H. \quad (6)$$

Как и в [1, 2], эти уравнения преобразуются к одному:

$$R_*HF^k(t) = J_{*1}(t)HF^{k-1}(t) + J_{*2}(t)HF^{k-2}(t) + \dots + J_{*k}(t)H,$$

которое можно переписать в виде:

$$(R_* \ J_{*1}(t) \ \dots \ J_{*k}(t))W^{(k)}(t) = 0, \quad (7)$$

где

$$W^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} HF^k(t) \\ HF^{k-1}(t) \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}.$$

Если $\Phi(t)D_1 = 0$, т.е. модель нечувствительна к первому дефекту, это можно записать в виде:

$$(R_* \ J_{*1}(t) \ \dots \ J_{*k}(t))D_1^{(k)}(t) = 0 \quad [1, 2], \text{ где}$$

$$D_1^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} HD_1 & HF(t)D_1 & \dots & HF(t)^{k-1}D_1 \\ 0 & HD_1 & \dots & HF(t)^{k-2}D_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Это условие и уравнение (7) могут быть объединены следующим образом:

$$(R_* \ J_{*1}(t) \ \dots \ J_{*k}(t))(W^{(k)}(t) \ D_1^{(k)}(t)) = 0. \quad (8)$$

Чтобы построить модель минимальной размерности, уравнение (8) решается при k , начиная с $k = 1$, что дает строку $(R_* \ J_{*1}(t) \ \dots \ J_{*k}(t))$. После этого из (6) определяется матрица $\Phi(t)$ и

проверяется, существует ли функция δ , для которой выполняется условие (3). Если существует, то определяется матрица $G_*(t)$, что завершает построение модели (4). Если нет, ищется другое решение уравнения (8), при этом размерность k , как правило, увеличивается на единицу. Поскольку рассматривается первый дефект, обозначим полученную матрицу $\Phi^{(1)}(t)$.

3. Построение банка моделей

Для определения оценок величин одновременно возникающих дефектов выбирается первый по порядку, и по изложенной выше методике строится модель (4), нечувствительная к этому дефекту. Далее методом, рассматриваемым ниже, строится вспомогательная система и решается задача оптимального управления, что дает оценку $w_1(t)$ переменной $D_0 d_0(t)$, представляющей собой сумму тех дефектов, к которым первый наблюдатель чувствителен.

Построенный первый наблюдатель чувствителен к дефектам, для которых $\Phi^{(1)}(t)D_j \neq 0$; выбираем среди них первый по порядку и аналогично строим второй наблюдатель, нечувствительный к этому дефекту, что дает матрицу $\Phi^{(2)}(t)$ и оценку $w_2(t)$. Аналогично выполняются последующие шаги; в результате каждого из них строятся матрицы $w_\Sigma(t) = (w_1(t) \ w_2(t) \ \dots \ w_q(t))^T$,

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \Phi^{(1)}(t) \\ \Phi^{(2)}(t) \\ \vdots \\ \Phi^{(q)}(t) \end{pmatrix}$$

и $\Phi(t)D_\Sigma$, где $D_\Sigma = (D_1 \ D_2 \ \dots \ D_p)$. Число q – минимальное, такое что $\text{rank}(\Phi(t)D_\Sigma) = n$ при всех t . Это означает, что уравнение

$$w_\Sigma(t) = (w_1(t) \ w_2(t) \ \dots \ w_q(t))^T = \Phi(t)(D_1 \ D_2 \ \dots \ D_p)(d_1(t) \ d_2(t) \ \dots \ d_p(t))^T \quad (9)$$

разрешимо относительно всех дефектов из $(d_1(t) \ d_2(t) \ \dots \ d_p(t))$. Условие $\text{rank}(\Phi(t)D_\Sigma) < n$ при всех q означает, что в $(d_1(t) \ d_2(t) \ \dots \ d_p(t))$ есть неразличимые дефекты, которые при имеющихся измерениях идентифицировать по отдельности невозможно.

Если на систему действует возмущение $\rho(t)$, то желательно строить модель, нечувствительную к нему, методом, описанным в [1, 2], однако нужно иметь в виду, что наверняка для некоторых дефектов нечувствительность к ним и возмущениям обеспечить не удастся, и получаемые оценки будут приближенными.

4. Вспомогательная задача и ее решение

Для получения оценок $w_1(t), \dots, w_q(t)$ используется методика, детально разработанная в [1, 2], поэтому ниже приводятся только основные ее положения на основе модели (4), нечувствительной к первому дефекту. Для обеспечения устойчивости модели в нее вводится обратная связь по сигналу невязки $r(t) = R_*y(t) - y_*(t)$ с коэффициентом усиления K , что дает

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= (F_* - KH_*)x_*(t) + G_*u(t) + (J_* + KR_*)y(t) + \delta(x_*(t), y(t), t) + D_0(t)d_0(t), \\ y_*(t) &= H_*x_*(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Методы выбора коэффициента K в нелинейном случае можно найти в [10].

Далее строится вспомогательная система

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= (F_* - KH_*)z(t) + G_*u(t) + (J_* + KR_*)y(t) + \delta(z(t), y(t), t) + v(t), \\ y_z(t) &= H_*z(t). \end{aligned}$$

От модели (10) она отличается новым обозначением вектора состояния и заменой неизвестной величины $D_0(t)d_0(t)$ переменной $v(t)$, рассматриваемой как вспомогательное управление. От него требуется перевести систему (9) из состояния $z(0)$ в состояние $z(t)$ такое, что $e(t) = z(t) - x_*(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$, и при этом минимизировать функционал

$$S = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e_y^T(t) Q e_y(t) + v^T(t) P v(t)) dt \rightarrow \min,$$

где P – положительно-определенная матрица, $Q > 0$, $e_y(t) = y(t) - y_*(t)$.

Для поиска управления используется преобразование Риккати [11]

$$\dot{z}(t) = M(t)\lambda(t) + g(t),$$

где $M(t)$ – невырожденная матрица, $g(t)$ – некоторая вектор-функция. Преобразование приводит к уравнениям для матрицы $M(t)$ и функции $g(t)$

$$\dot{M} = \bar{F}_* M + M \bar{F}_*^T + M \bar{H}_*^T Q H_* M - D_0^T P^{-1} D_0 + M \left(\frac{\partial \delta(z, y, t)}{\partial z} \right)^T \bar{F}_*^T, \quad (11)$$

$$\dot{g} = \bar{F}_* g + \bar{J}_* y + G_* u + \delta(x_*, y, t) - M \bar{H}_*^T Q y_* + M \bar{H}_*^T Q H_* g, \quad (12)$$

где $\bar{F}_* = F_* - K H_*$, $\bar{J}_* = J_* + K R$. Окончательно для управления $v(t)$ получаем

$$v(t) = -P^{-1} D_0^T M^{-1}(t)(z(t) - g(t)) \rightarrow w_1(t). \quad (13)$$

Аналогичная задача решается для каждой модели, в результате чего строится банк наблюдателей, определяются матрица $\Phi(t)$, оценки $w_1(t)$, $w_2(t)$, ..., $w_q(t)$, и при выполнении условия $\text{rank}(\Phi(t)D_\Sigma) = n$ решается система алгебраических уравнений (9).

5. Пример

Рассмотрим электропривод манипулятора, описанный уравнениями [12]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{1}{i_r} x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{k_\theta + v^*(t)}{J + V^*(t)} x_2(t) + \frac{k_m}{J + V^*(t)} x_3(t) + d_1(t), \\ \dot{x}_3(t) &= -\frac{k_\omega}{L_m} x_2(t) - \frac{R_m}{L_m} x_3(t) + \frac{k_y}{L_m} u(t) + d_2(t). \end{aligned}$$

Здесь $x_1(t)$ – угол поворота выходного вала редуктора, $x_2(t)$ – скорость вращения ротора, $x_3(t)$ – ток якоря; переменная $V^*(t)$ описывает инерционные свойства степени подвижности манипулятора; переменная $v^*(t)$ описывает кориолисовы и скоростные силы. Предполагается, что измеряются переменные $x_1(t)$ и $x_3(t)$. Введем следующие обозначения:

$$\mu_1 = \frac{1}{i_r}, \quad \mu_2(t) = -\frac{k_\theta + v^*(t)}{J + V^*(t)}, \quad \mu_3(t) = \frac{k_m}{J + V^*(t)}, \quad \mu_4 = -\frac{k_\omega}{L_m}, \quad \mu_5 = -\frac{R_m}{L_m}, \quad \mu_6 = \frac{k_y}{L_m}, \quad \mu_6 = \frac{k_y}{L_m}.$$

Приведем матрицы, описывающие электропривод:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_3 \\ 0 & \mu_4 & \mu_5 \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mu_6 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Построим модель, нечувствительную к $d_1(t)$. Уравнение (7) имеет решение $R_* = (\mu_4 \quad -\mu_1)$, $J_* = (0 \quad -\mu_1 \mu_5)$, $\Phi^{(1)} = (\mu_4 \quad 0 \quad -\mu_1)$ и модель

$$\dot{x}_*(t) = -\mu_1 \mu_5 y_2(t) - \mu_1 \mu_6 u(t) - \mu_1 d_2(t).$$

Обратная связь по сигналу невязки $r = R_*y(t) - x_*(t) = \mu_4 y_1(t) - \mu_1 y_2(t) - x_*(t)$ с коэффициентом $K = 1$ дает следующее уравнение:

$$\dot{x}_*(t) = -x_*(t) + \mu_4 y_1(t) - (\mu_1 \mu_5 + \mu_1) y_2(t) - \mu_1 \mu_6 u(t) - \mu_1 d_2(t).$$

Наблюдатель строится на основе уравнений (11), (12) с $\delta(x_*, y, t) = 0$.

Построим модель, нечувствительную к $d_2(t)$. Уравнение (7) имеет решение $R_* = (1 \ 0)$,

$$J_* = \begin{pmatrix} \mu_2(t) & 0 \\ 0 & \mu_1 \mu_3(t) \end{pmatrix}, \quad \Phi^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\mu_2(t) & \mu_1 & 0 \end{pmatrix}$$

и модель

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}(t) &= x_{*2}(t) + \mu_2(t) y_1(t), \\ \dot{x}_{*2}(t) &= \mu_1 \mu_3(t) y_2(t) - \delta_*(t) y_1(t) + \mu_1 d_1(t), \\ y_*(t) &= x_{*1}(t), \end{aligned}$$

где

$$\delta_*(t) = \frac{\dot{v}^*(t)(J + V^*(t)) - v^*(t)(k_g + v^*(t))}{(J + V^*(t))^2},$$

поскольку $v^*(t) = \dot{V}^*(t)$ [12]. Обратная связь по сигналу невязки $r = R_*y(t) - y_*(t) = y_1(t) - x_{*1}(t)$ с коэффициентом $K = (2 \ 1)$ дает

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}(t) &= -2x_{*1}(t) + x_{*2}(t) + (\mu_2(t) + 2) y_1(t), \\ \dot{x}_{*2}(t) &= \mu_1 \mu_3(t) y_2(t) + \delta(y(t), t) + \mu_1 d_1(t) + y_1(t) - x_{*1}(t), \\ y_*(t) &= x_{*1}(t). \end{aligned}$$

Наблюдатель строится на основе уравнений (11), (12). Как видно из уравнений, описывающих модели, дефекты могут быть оценены независимо друг от друга.

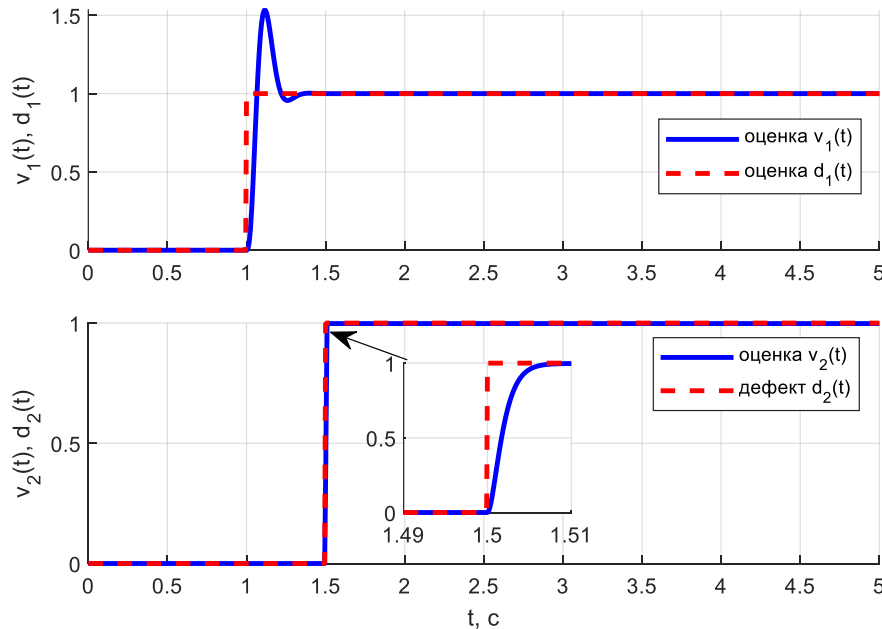


Рис. 1. Результат оценки дефектов наблюдателями
Fig. 1. The result of the estimation of defects by observers

Для численного моделирования одновременной работы наблюдателей по оценке каждого из дефектов параметры модели электропривода возьмем равными $J = 0,001 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $R_m = 0,4 \ \Omega$; $L_m = 0,004 \text{ Гн}$; $k_m = 0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$; $k_\omega = 0,05 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{рад}$; $i_r = 100$; $k_u = 10$. Параметры нестационарности можно задать в виде: $V^*(t) = (1 + \sin(t)) / i_r^2$, $v^*(t) = \dot{V}^*(t)$.

Параметры Q, P, K наблюдателей выберем в виде: для дефекта $d_1(t) - Q = 10^8, P = 10^{-2}, K = [2 \ 1]$; для дефекта $d_2(t) - Q = 10^{10}, P = 1, K = 1$. Дефекты зададим в виде единичных ступенчатых функций с временем скачка соответственно $t_1 = 1, t_2 = 1,5$ с.

На рис/ 1 показаны результаты моделирования: графики сверху – дефект $d_1(t)$ и его оценка; графики снизу – дефект $d_2(t)$ и его оценка. Результат показывает, что синтезированные наблюдатели позволяют одновременно и независимо обнаружить и идентифицировать оба дефекта с приемлемой точностью.

Заключение

Рассмотрена и решена задача оценивания величин одновременно возникающих дефектов в линейных нестационарных системах. Для решения использованы методы оптимального управления, для чего строится банк наблюдателей с избирательной чувствительностью к различным дефектам. Каждый наблюдатель построен так, что дает суммарную оценку величин дефектов той группы, к которой этот наблюдатель чувствителен. Путем решения системы алгебраических уравнений определяются оценки величин всех дефекта. Теоретические положения проиллюстрированы практическим примером.

Список источников

1. Кабанов А.А., Зуев А.В., Жиравок А.Н., Филаретов В.Ф. Метод идентификации дефектов: подход на основе методов оптимального управления // Автоматика и телемеханика. 2023. № 9. С. 82–94.
2. Кабанов А.А., Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Жиравок А.Н. Идентификация дефектов в линейных системах на основе методов оптимального управления // Известия вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 335–342.
3. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers // Automatica. 2007. V. 43. P. 1605–1614.
4. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. Non-minimum phase switched systems: HOSM based fault detection and fault identification via volterra integral equation // Intern. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2014. V. 28. P. 1372–1397.
5. Rajesh R.J., Shtessel Y., Edwards C. Accuracy improvement of dynamic sensors using sliding mode observers with dynamic extension // Sensors and Actuators. 2020. V. A 316. Art. 112396.
6. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. Robust fault tolerant control desing for nonlinear systems not satisfying maching and minimum phase conditions // Int. J. Control, Automation and Systems. 2020. V. 18. P. 1–14.
7. Chen L., Edwards C., Alwi H., Sato M. Flight evaluation of a sliding mode online control allocation scheme for fault tolerant control // Automatica. 2020. V. 114. Art. 108829.
8. 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.
9. Sergiyenko O., Tyrsa V., Zhirabok A., Zuev A. Sliding mode observer based fault identification in automatic vision system of robot // Control Engineering Practice. Elsevier. 2023. V. 139. Art. 105614.
10. Misawa E., Hedrick J. Nonlinear observers – a state of the art. Survey // J. Dynamic Systems, Measurements Control. 1989. V. 111. P. 344–352.
11. Mufti I.H., Chow C.K., Stock F.T. Solution of Ill-conditioned Linear Two-point Boundary Value Problems by the Riccati Transformation // SIAM Rev. 1969. V. 11 (4). P. 616–619
12. Зуев А.В., Жиравок А.Н., Филаретов В.Ф., Проценко А.А. Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 22, № 12. С. 625–633.

References

1. Kabanov, A.A., Zuev, A.V., Zhirabok, A.N. & Filaretov, V.F. (2023) Fault identification: an approach based on optimal control methods. *Automation and Remote Control*. 9. pp. 82–94.
2. Kabanov, A.A., Zuev, A.V., Filaretov, V.F. & Zhirabok, A.N. (2022) Identifikatsiya defektov v lineynykh sistemakh na osnove metodov optimal'nogo upravleniya [Defect Identification in Linear Systems Based on Optimal Control Methods]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 65(5). pp. 335–342.
3. Yan, X. & Edwards, C. (2007) Nonlinear Robust Fault Reconstruction and Estimation Using Sliding Mode Observers. *Automatica*. 43. pp. 1605–1614.

4. Rios, H., Efimov, D., Davila, J., Raissi, T., Fridman, L. & Zolghadri, A. (2014) Non-Minimum Phase Switched Systems: HOSM Based Fault Detection and Fault Identification via Volterra Integral Equation. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 28. pp. 1372–1397.
5. Rajesh, R.J., Shtessel, Y. & Edwards, C. (2020) Accuracy Improvement of Dynamic Sensors Using Sliding Mode Observers with Dynamic Extension. *Sensors and Actuators A: Physical*. 316. 112396.
6. Hmidi, R., Brahim, A., Hmida, F. & Sellami, A. (2020) Robust Fault Tolerant Control Design for Nonlinear Systems Not Satisfying Matching and Minimum Phase Conditions. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 18. pp. 1–14.
7. Chen, L., Edwards, C., Alwi, H. & Sato, M. (2020) Flight Evaluation of a Sliding Mode Online Control Allocation Scheme for Fault Tolerant Control. *Automatica*. 114. 108829.
8. 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.
9. Sergienko, O., Tyrsa, V., Zhirabok, A. & Zuev, A. (2023) Sliding Mode Observer Based Fault Identification in Automatic Vision System of Robot. *Control Engineering Practice*. 139. 105614.
10. Misawa, E. & Hedrick, J. (1989) Nonlinear Observers – A State of the Art Survey. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 111. pp. 344–352.
11. Mufti, I.H., Chow, C.K. & Stock, F.T. (1969) Solution of Ill-Conditioned Linear Two-Point Boundary Value Problems by the Riccati Transformation. *SIAM Review*. 11(4). pp. 616–619.
12. Zuev, A.V., Zhirabok, A.N., Filaretov, V.F. & Protsenko, A.A. (2022) Identifikatsiya defektov v nestatsionarnykh sistemakh na osnove skol'zyashchikh nablyudateley [Fault identification in non-stationary systems based on sliding mode observers]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 22(12). pp. 625–633.

Информация об авторах:

Кабанов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия). E-mail: kabanovaleksey@gmail.com

Жирабок 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

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

Information about the authors:

Kabanov Aleksey A. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation). E-mail: kabanovaleksey@gmail.com.

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, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: pro293133@gmail.com.

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

Поступила в редакцию 25.09.2025; принята к публикации 05.03.2026

Received 25.09.2025; accepted for publication 05.03.2026