

А. В. Зуев^{1, 2}, канд. техн. наук, доц., alvzuev@yandex.ru,
А. Н. Жирабок^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru,
В. Ф. Филаретов³, д-р техн. наук, проф., filaretov@inbox.ru,
А. А. Проценко², мл. науч. сотр., pro293133@gmail.com,

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,

² Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток,

³ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей*

Рассматривается задача идентификации дефектов в системах, описываемых нестационарными нелинейными динамическими уравнениями, в присутствии возмущений. Для решения задачи используются наблюдатели, работающие в скользящем режиме. Предлагаемый подход базируется на идее построения редуцированной модели исходной системы, обладающей избирательной чувствительностью по отношению к дефектам и возмущению и реализованной в канонической форме. Основной целью введения такой модели является возможность учета нестационарности системы. Кроме того, за счет модели такого вида удастся ослабить ограничения, при которых для исходной системы могут быть построены скользящие наблюдатели. Изложенная теория иллюстрируется практическим примером.

Ключевые слова: нелинейные нестационарные системы, дефекты, наблюдатели, скользящие режимы, идентификация

Введение

Одной из задач функционального диагностирования является задача идентификация дефектов [1], последние годы для ее реализации активно применяется подход, основанный на наблюдателях, работающих в скользящем режиме и использующих особенности этого режима [2]. Далее наблюдатель со скользящим режимом работы будем называть *скользящим наблюдателем*.

Настоящая публикация является логическим продолжением статей [3, 4], посвященных разработке методов построения скользящих наблюдателей для решения задачи идентификации дефектов. Указанные наблюдатели описываются дифференциальным уравнением с разрывной правой частью и обеспечивают возникновение в системе скользящего режима при соблюдении определенных условий.

Скользящие наблюдатели применяются для решения задачи идентификации дефектов в линейных [3, 5–7] и нелинейных [4, 8, 9] системах, для обеспечения отказоустойчивого

управления [10], в ряде практических приложений [11–13]. 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 были предложены методы, использующие скользящие наблюдатели высокого порядка [14, 15] и каскадное соединение наблюдателей [16], но при этом система должна быть минимально фазовой. В работе [17] последнее условие ослаблено ценой того, что в выражение для оценки дефекта входит производная величины дефекта, в статье [18] для этого вводится предположение об ограниченности ошибки оценивания. В работах [19, 20] требование минимальной фазовости ослаблено до условия детектируемости.

Отметим, что в известных работах скользящие наблюдатели строятся на основе исходной системы и, следовательно, имеют размерность, совпадающую с размерностью этой системы. В настоящей статье предложен метод, позволяющий учитывать нестационарность системы. В его основе лежит идея использования редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, реализованной в канонической форме. Это, а также новый метод

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 20-38-70161, частично проект 19-08-00347, а также частично стипендией Президента РФ СП-3252.2019.5.

построения скользящих наблюдателей позволили обойтись без условий согласования, минимальной фазовости и детектируемости системы. Кроме того, это дает возможность уменьшить размерность скользящих наблюдателей.

1. Основные соотношения

Рассмотрим систему, описанную нелинейной моделью

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F(t)x(t) + G(t)u(t) + \\ &+ C(t)\Psi(x(t), u(t)) + Dd(t) + L\rho(t); \quad (1.1) \\ y(t) &= Hx(t). \end{aligned}$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; $F(t) \in R^{n \times n}$, $G(t) \in R^{n \times m}$ и $C(t) \in R^{n \times s}$ — матричные функции с известными законами изменения во времени, функция $F(t)$ предполагается дифференцируемой; матрицы $D \in R^{n \times 1}$, $L \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{l \times n}$ предполагаются постоянными; $d(t) \in R$ — функция, описывающая дефект: при его отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; $\rho(t) \in R^p$ — неизвестная функция времени, описывающая действующие на систему возмущения; $\Psi(x, u)$ — нелинейная составляющая:

$$\Psi(x, u) = \begin{pmatrix} \varphi_1(A_1x, u) \\ \dots \\ \varphi_s(A_sx, u) \end{pmatrix},$$

$A_1, \dots, A_s$ — матрицы-строки; $\varphi_1, \dots, \varphi_s$ — нелинейные (возможно, недифференцируемые) функции, удовлетворяющие условию Липшица по аргументу x , откуда следует, что функция $\Psi(x, u)$ также удовлетворяет условию Липшица, т. е.

$$\|\Psi(x, u) - \Psi(x', u)\| \leq N \|x - x'\| + M, \quad (1.2)$$

$N, M \geq 0$ — некоторые константы. Предполагается, что известны и ограничены нормы $\|d(t)\|$ и $\|\rho(t)\|$ векторов $d(t)$ и $\rho(t)$.

Скалярный характер функции $d(t)$ соответствует предположению о том, что рассматриваются только однократные дефекты, что, как правило, выполняется на практике. Для решения задачи идентификации кратных дефектов функция $d(t)$ должна предполагаться векторной.

Для решения задачи идентификации функции $d(t)$ в случае постоянных матриц F и G в работе [8]

предполагается, что система (1.1) 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 (минимальная фазовость).

Целью настоящей работы является решение задачи идентификации дефектов для нестационарной системы при отказе и от условий согласования, минимальной фазовости и детектируемости. Особенность решения состоит в том, что скользящие наблюдатели строятся на основе модели исходной системы пониженной размерности, что дополнительно приводит к понижению размерности наблюдателей. Эффект отказа от отмеченных выше условий достигается за счет нового метода построения скользящего наблюдателя на основе канонической формы матриц, описывающих модель пониженной размерности.

Принимая, что модель пониженной размерности характеризуется вектором состояния $x_* \in R^k$, $k < n$, будем предполагать, что при отсутствии дефектов и возмущений справедливо равенство

$$x_*(t) = \Phi(t)x(t) \quad (1.3)$$

для некоторой дифференцируемой матричной функции $\Phi(t)$. Также предполагается, что функция $\dot{\Phi}(t)x(t)$ может быть выражена через переменные $x_*(t)$ и $y(t)$, т. е.

$$\dot{\Phi}(t)x(t) = \alpha(x_*(t), y(t), t) \quad (1.4)$$

для всех $t \geq 0$, некоторой функции α .

Построим модель системы (1.1) пониженной размерности, не чувствительную к возмущению $\rho(t)$, которая описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= F_*x_*(t) + G_*(t)u(t) + J_*(t)y(t) + \\ &+ C_*(t)\Psi(x_*(t), y(t), u(t)) + \\ &+ \alpha(x_*(t), y(t), t) + D_*(t)d(t); \quad (1.5) \\ y_*(t) &= H_*x_*(t), \end{aligned}$$

где F_* , $G_*(t)$, $J_*(t)$, $C_*(t)$, H_* и $D_*(t)$ — матрицы и матричные функции, подлежащие определению; функция $\Psi(x_*, y, u)$ имеет вид

$$\Psi(x_*, y, u) = \begin{pmatrix} \varphi_{i_1}(A_{*1i_1}x_* + A_{*2i_1}y, u) \\ \dots \\ \varphi_{i_p}(A_{*1i_p}x_* + A_{*2i_p}y, u) \end{pmatrix},$$

$A_{*1i_1}, A_{*2i_1}, \dots, A_{*1i_p}, A_{*2i_p}$ — матрицы, подлежащие определению; $i_1, \dots, i_p$ — номера нелинейностей, входящих в модель (1.5).

Отметим, что в (1.5) матрица F_* предполагается постоянной, имеющей вместе с матрицей H_* канонический вид, определяемый ниже. Этим предлагаемый подход существенно отличается от подходов, развитых в работе [8] и аналогичных работах, где наблюдатели строятся на основе исходной системы (1.1), нестационарность которой существенно усложняет анализ условий возникновения скользящего режима.

По аналогии с (1.3) предполагается, что при отсутствии дефектов и возмущений выполняется равенство $y_*(t) = R_* y(t)$ для некоторой матрицы R_* . Как и в работе [4], можно показать, что справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\Phi(t)F(t) &= F_*\Phi(t) + J_*(t)H; \\ R_*H &= H_*\Phi(t); G_*(t) = \Phi(t)G(t); \\ D_*(t) &= \Phi(t)D; A_i = (A_{*1i} \ A_{*2i}) \begin{pmatrix} \Phi(t) \\ H \end{pmatrix}; i = \overline{i_1, i_p}; \\ C_*(t) &= \Phi(t)C(t).\end{aligned}\quad (1.6)$$

Матрицы F_* и H_* будем искать в каноническом виде

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

Это всегда можно сделать, если пара (F_*, H_*) наблюдаема [21]. В случае, когда она ненаблюдаема, линейную часть системы (1.5) можно представить в канонической форме наблюдаемости [21], и для ее наблюдаемой части задавать матрицы F_* и H_* в каноническом виде. Такой вид матриц позволяет получить уравнения для строк матриц $\Phi(t)$ и J_* :

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= R_*H; \\ \Phi_i(t)F(t) &= \Phi_{i+1}(t) + J_{*i}(t)H, i = \overline{2, k}; \\ \Phi_k(t)F(t) &= J_{*k}(t)H.\end{aligned}\quad (1.7)$$

В работах [3, 4] показано, что эти уравнения могут быть свернуты в одно:

$$\begin{aligned}R_*HF^k(t) &= J_{*1}(t)HF^{k-1}(t) + \\ &+ J_{*2}(t)HF^{k-2}(t) + \dots + J_{*k}(t)H.\end{aligned}$$

Запишем его в виде

$$(R_* J_{*1}(t) \dots J_{*k}(t))W^{(k)}(t) = 0, \quad (1.8)$$

где

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

Известно, что условие $\Phi L = 0$ нечувствительности к возмущению имеет вид $(R_* J_{*1}(t) \dots J_{*k}(t))L^{(k)}(t) = 0$ [3, 4], где

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

Последнее условие и соотношение (1.8) дают уравнение

$$(R_* J_{*1}(t) \dots J_{*k}(t))(W^{(k)}(t) L^{(k)}(t)) = 0, \quad (1.9)$$

решение которого находится при минимальном значении k . Далее из уравнений (1.7) определяются строки матрицы $\Phi(t)$ и проверяется возможность представления функции $\Phi(t)x(t)$ в виде (1.4). При положительном исходе этой проверки находится матрица $C_*(t) = \Phi(t)C(t)$ и проверяется семейство условий

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi(t) \\ H \\ A_i \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \Phi(t) \\ H \\ A_i \end{pmatrix}, i = \overline{i_1, i_p}. \quad (1.10)$$

Если все они выполняются, принимаем $G_*(t) = \Phi(t)G(t)$ и $D_*(t) = \Phi(t)D$; матрицы A_{*1i} и A_{*2i} , $i = \overline{i_1, i_p}$, определяются из соотношений (1.6). При невыполнении условия (1.10) ищется другое решение уравнения (1.9) при прежней или увеличенной размерности k .

2. Преобразование редуцированной модели

Представим описывающие модель (1.5) матрицы и функции в следующем виде:

$$\begin{aligned}F_* &= \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{pmatrix}; H_* = (1 \ \dots \ 0 \ 0); G_*(t) = \begin{pmatrix} G_1(t) \\ G_2(t) \end{pmatrix}; \\ J_*(t) &= \begin{pmatrix} J_1(t) \\ J_2(t) \end{pmatrix}; C_*(t) = \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{pmatrix}; D_*(t) = \begin{pmatrix} D_1(t) \\ D_2(t) \end{pmatrix}; \\ \Phi(t) &= \begin{pmatrix} \Phi^{(1)}(t) \\ \Phi^{(2)}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_*H \\ \Phi^{(2)}(t) \end{pmatrix}; \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_2 \end{pmatrix},\end{aligned}\quad (2.1)$$

где

$$F_1 = 0; F_2 = (1 \dots 0 \ 0) \in R^{1 \times (k-1)}; F_3 = 0 \in R^{(k-1) \times 1};$$

$$F_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \in R^{(k-1) \times (k-1)},$$

остальные матрицы в (2.1) имеют соответствующие размеры. Функция α_1 равна нулю, так как она определяется функцией $\dot{\Phi}_1(t)x(t)$, а $\Phi_1(t) = R_*H = \text{const}$.

Введем преобразование координат $z = Tx_*$ с матрицей $T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Q & I_{k-1} \end{pmatrix}$, где $I_{k-1} \in R^{(k-1) \times (k-1)}$ — тождественная матрица, $Q \in R^{(k-1) \times 1}$ выбирается так, чтобы сделать матрицу $\bar{F}_4 = F_4 + QF_2$ устойчивой. Поскольку пара (F_4, F_2) с очевидностью наблюдаема, такая матрица существует, представим ее в виде $Q = (q_1 \ q_2 \dots q_{k-1})^T$. В результате модель (1.3) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= \bar{F}_1 y_*(t) + \bar{F}_2 z_2(t) + \bar{G}_1(t)u(t) + \bar{J}_1(t)y(t) + \\ &+ \bar{C}_1(t)\Psi(z_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + \bar{D}_1(t)d(t); \\ \dot{z}_2(t) &= \bar{F}_3 y_*(t) + \bar{F}_4 z_2(t) + \bar{G}_2(t)u(t) + \\ &+ \bar{J}_2(t)y(t) + \bar{C}_2(t)\Psi(z_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + \\ &+ \bar{\alpha}_2(z_2(t), y_*(t), y(t), t) + \bar{D}_2(t)d(t); \\ y_* &= z_1, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{F}_1 &= -q_1, \quad \bar{F}_2 = F_2 = (1 \ 0 \ 0 \dots 0) \in R^{1 \times (k-1)}; \\ \bar{F}_3 &= -\begin{pmatrix} q_1^2 + q_2 \\ q_1 q_2 + q_3 \\ q_1 q_3 + q_4 \\ \vdots \\ q_1 q_{k-1} \end{pmatrix}; \quad \bar{F}_4 = \begin{pmatrix} q_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ q_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ q_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{k-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; \\ \bar{G}_1(t) &= G_1(t); \quad \bar{G}_2(t) = QG_1(t) + G_2(t); \\ \bar{J}_1(t) &= J_1(t); \quad \bar{J}_2(t) = QJ_1(t) + J_2(t); \\ \bar{C}_1(t) &= C_1(t); \quad \bar{C}_2(t) = QC_1(t) + C_2(t); \\ \bar{D}_1(t) &= D_1(t); \quad \bar{D}_2(t) = QD_1(t) + D_2(t); \\ \bar{\alpha}_2(z_2(t), y_*(t), y(t), t) &= \alpha_2(z_2(t), y_*(t), y(t), t). \end{aligned}$$

Отметим, что ключевую роль в модели (2.2) играет тот факт, что матрица $\bar{F}_4$ устойчива. В работе [8] это следует из минимальной фазо-

вости системы, в работе [20] — из условия ее детектируемости, в нашей работе — из канонического вида матриц F_* и H_* .

3. Построение скользящего наблюдателя

Поскольку матрица $\bar{F}_4$ устойчива, существуют симметрические положительно определенные матрицы P и W такие, что $\bar{F}_4^T P + P \bar{F}_4 = -W$. По аналогии с работой [8] скользящий наблюдатель строится в виде

$$\begin{aligned} \hat{\dot{z}}_1(t) &= \bar{F}_1 y_*(t) + \bar{F}_2 \hat{z}_2(t) + \bar{G}_1 u(t) + \bar{J}_1 y(t) + \\ &+ \bar{C}_1 \Psi(\hat{z}_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + k_2 e_1(t) + k_3 v(t); \\ \hat{\dot{z}}_2(t) &= \bar{F}_3 y_*(t) + \bar{F}_4 \hat{z}_2(t) + \bar{G}_2 u(t) + \\ &+ \bar{J}_2 y(t) + \bar{C}_2 \Psi(\hat{z}_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + \\ &+ \bar{\alpha}_2(\hat{z}_2(t), y_*(t), y(t), t) + \bar{K}_1 v(t); \\ \hat{y}_* &= \hat{z}_1, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $e_1(t) = z_1(t) - \hat{z}_1(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t)$; $v(t) = \text{sign}(e_1(t))$; $\bar{K}_1 = P^{-1} \bar{F}_2^T k_1$; k_1, k_2, k_3 — положительные числа.

Из соотношений (2.2) и (3.1) получаем

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= \bar{F}_2 e_2(t) + \bar{C}_1(t) \Delta \Psi(t) + \\ &+ \bar{D}_1(t) d(t) - k_2 e_1(t) - k_3 v_1(t); \\ \dot{e}_2(t) &= \bar{F}_4 e_2(t) + \bar{C}_2(t) \Delta \Psi(t) + \\ &+ \Delta \alpha(t) + \bar{D}_2(t) d(t) - \bar{K}_1 v_2(t), \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $e_2(t) = z_2(t) - \hat{z}_2(t)$; $\Delta \Psi(t) = \Psi(z_2, y_*, y, u) - \Psi(\hat{z}_2, y_*, y, u)$; $\Delta \alpha(t) = \bar{\alpha}_2(y_*(t), z_2(t), y(t), t) - \bar{\alpha}_2(y_*(t), \hat{z}_2(t), y(t), t)$.

Будем полагать, что функции $\Psi(x, u)$ и $\alpha_2(x_*, y, t)$ удовлетворяют условию Липшица (1.2), тогда $\Psi(\hat{z}_2, y_*, y, u)$ и $\bar{\alpha}_2(\hat{z}_2, y_*, y, t)$ также удовлетворяют этому условию и

$$\begin{aligned} \|\bar{C}_1 \Delta \Psi\| &\leq N_{*1} \|e_2(t)\| + M_{*1}; \\ \|\bar{C}_2 \Delta \Psi + \Delta \alpha(t)\| &\leq N_{*2} \|e_2(t)\| + M_{*2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

для некоторых $N_{*1}, M_{*1}, N_{*2}, M_{*2} \geq 0$. Отметим, что ненулевые значения M_{*1} и M_{*2} используются в доказательстве асимптотической устойчивости скользящего движения системы (3.2). Вместе с тем, известно [5], что скользящее движение дает $e(t) = 0$, т. е. $\hat{x}_*(t) = x_*(t)$, и в этом случае можно принять $M_{*1} = M_{*2} = 0$.

Теорема. Если $\lambda_{\min}(W) \geq 2\|P\|N_{*2}$, то наблюдатель (3.1) оценивает функцию $d(t)$ в виде

$$\hat{d}(t) = D_2^+ \bar{K}_1 v_{eq}(t) \quad (3.4)$$

в случае, когда $\bar{D}_1 = 0$, и в виде

$$\hat{d}(t) = k_3 D_1^+ v_{eq}(t) \quad (3.5)$$

в противном случае, где $D_1^+ = (\bar{D}_1^T \bar{D}_1)^{-1} \bar{D}_1$ и $D_2^+ = (\bar{D}_2^T \bar{D}_2)^{-1} \bar{D}_2$; $v_{eq}(t)$ — сигнал, представляющий разрывную функцию $v(t)$. Согласно работе [8], в качестве $v_{eq}(t)$ может быть принята непрерывная функция

$$v_{eq}(t) = \frac{e_1(t)}{\|e_1(t)\| + \varepsilon}, \quad (3.6)$$

где ε — малое положительное число.

Доказательство. Детальное доказательство опускается, оно аналогично приведенному в работе [20]. Отметим только, что оно проводится в три этапа, на первом из которых показывается, что $\|e_2\| \leq \delta$ для некоторого $\delta > 0$, на втором доказывается, что при соответствующем выборе коэффициентов усиления k_1, k_2, k_3 наблюдателя $e_1 = 0$ за конечное время, т. е. достигается скользящий режим, на третьем доказывается аналогичное утверждение для ошибки e_2 . Коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются из следующих условий:

$$k_1 \geq \frac{\delta(\beta\|P\bar{D}_2\| + \|P\|(\delta N_{*2} + M_{*2}))}{k_3 - \beta\|\bar{D}_1\| - \delta N_{*1} - M_{*1}};$$

$$k_2 > 0;$$

$$k_3 \geq \beta\|\bar{D}_1\| + \delta(1 + N_{*1}) + M_{*1}, \beta \geq \|d(t)\|.$$

Поскольку в скользящем режиме $e_1 = \dot{e}_1 = 0$ и $e_2 = \dot{e}_2 = 0$, то при $\bar{D}_1 = 0$ функция $d(t)$ может быть оценена из второго уравнения в (3.2) в виде (3.4); в противном случае используется первое уравнение, что дает оценку (3.5).

4. Практический пример

Рассмотрим модель нагруженного электропривода, управляющего одной степенью подвижности многозвенного манипулятора, описанную уравнениями

$$\dot{x}_1(t) = \frac{1}{i_r} x_2(t) + d_1(t);$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{k_b + h^*(t)}{J + H^*(t)} x_2(t) + \frac{k_m}{J + H^*(t)} x_3(t) - \frac{M_b^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \text{sign}(x_2(t)) + d_2(t);$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{k_\omega}{L_m} x_2(t) - \frac{R_m}{L_m} x_3(t) + \frac{k_y}{L_m} U(t) + d_3(t),$$

где $x_1(t) = \alpha_n(t)$ — угол поворота выходного вала редуктора электропривода; $x_2(t) = \dot{\alpha}(t)$ — скорость вращения ротора электродвигателя; $x_3(t) = I(t)$ — сила тока якоря, где R_m — номинальное активное сопротивление цепи якоря; L_m — индуктивность цепи якоря; k_ω — коэффициент противоЭДС; k_y — коэффициент усиления усилителя мощности; k_b — коэффициент вязкого трения; k_m — коэффициент крутящего момента; J — момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный в этому ротору; $M_{тр}$ — величина номинального момента сухого трения; i_r — передаточное отношение редуктора; $U(t)$ — входное напряжение электропривода; $H^*(t)$ — известная переменная компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей степени подвижности манипулятора; $h^*(t)$ — известная переменная компонента кориолисовых и скоростных сил; $M_b^*(t)$ — известное переменное моментное воздействие, учитывающее гравитационные силы и эффекты взаимовлияний между всеми степенями подвижности манипулятора в процессе его движения.

При работе манипулятора в его электроприводах могут возникать различные дефекты, которые приводят к появлению в правых частях уравнений дополнительных составляющих $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_3(t)$ — неизвестных функций, характеризующих влияние на работу электропривода часто возникающих типовых дефектов: ошибки измерения угла датчиком положения $\hat{\alpha}_n(t)$, появления неучтенного моментного воздействия $\hat{M}(t)$ (например, при увеличении моментов вязкого или сухого трений) и отклонения активного сопротивления цепи якоря от номинального значения $\hat{R}_m$:

$$d_1(t) = \dot{\hat{\alpha}}_n(t);$$

$$d_2(t) = -\frac{\hat{M}(t)}{J + H^*(t)}; d_3(t) = -\frac{\hat{R}_m}{L_m} x_3(t).$$

Приведем матрицы, описывающие электропривод:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{i_r} & 0 \\ 0 & -\frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} & \frac{k_m}{J + H^*(t)} \\ 0 & -\frac{k_\omega}{L_m} & -\frac{R_m}{L_m} \end{pmatrix},$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_y/L_m \end{pmatrix}; \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad L = 0;$$

$$\varphi(x, u) = -\frac{M_B^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \text{sign}(Ax(t));$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим синтез скользящего наблюдателя для идентификации величины $\hat{M}(t)$. Решив уравнение (1.9), получим матрицы

$$J_* = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} \\ 0 & -\frac{k_m k_\omega + (k_B + h^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} \end{pmatrix};$$

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{k_\omega}{L_m} & \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} \end{pmatrix}; \quad R_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$G_* = \begin{pmatrix} k_y/L_m \\ \frac{k_y}{L_m} \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} \end{pmatrix}; \quad C_* = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{k_\omega}{L_m} \end{pmatrix}; \quad D_* = -\frac{k_\omega}{L_m}$$

Известно, что $\dot{H}^*(t) = h^*(t)$; тогда нетрудно видеть, что функция $\dot{\Phi}(t)x(t)$ выражается через переменную $y_2(t)$ и имеет вид

$$\alpha(y(t), t) = \dot{\Phi}(t)x(t) =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\dot{h}^*(t)(J + H^*(t)) - h^*(t)(k_B + h^*(t))}{(J + H^*(t))^2} y_2(t) \end{pmatrix}.$$

Модель имеет следующий вид:

$$\dot{z}_1(t) = z_2(t) - \frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} \times$$

$$\times y_2(t) + \frac{k_y}{L_m} u(t);$$

$$\dot{z}_2(t) = -\frac{k_m k_\omega + (k_B + h^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) +$$

$$+ \frac{k_y}{L_m} \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} u(t) - \frac{k_\omega}{L_m} d_2(t) + \alpha(y(t), t) -$$

$$- \frac{k_\omega}{L_m} \left(-\frac{M_B^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \times \right.$$

$$\times \text{sign} \left(\left(-z_2(t) + \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} y_2(t) \right) \frac{L_m}{k_\omega} \right);$$

$$y_* = z_1.$$

Нетрудно видеть, что для нелинейности sign в соотношении (3.3) нужно принять $N_* = 0$, $M_* = 2$. Поскольку $F_4 = 0$ и $F_2 = 1$, примем $Q = -1$; тогда $\bar{F}_4 = -1$, откуда можно положить $P = 1$, что дает $W = 2$. Наблюдатель имеет вид

$$\dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{z}_1(t) + \hat{z}_2(t) -$$

$$- \frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) +$$

$$+ \frac{k_y}{L_m} u(t) + k_2 e_1(t) + k_3 v(t);$$

$$\dot{\hat{z}}_2(t) = -\frac{k_m k_\omega + (k_B + h^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) +$$

$$+ \frac{k_y}{L_m} \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} u(t) + \alpha_2(y(t), t) +$$

$$- \frac{k_\omega}{L_m} \left(-\frac{M_B^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \times \right.$$

$$\times \text{sign} \left(\left(-z_2(t) + \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} y_2(t) \right) \frac{L_m}{k_\omega} \right) +$$

$$+ \bar{K}_1 v(t) - \hat{z}_1(t) - \hat{z}_2(t) +$$

$$+ \frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) - \frac{k_y}{L_m} u(t);$$

$$\hat{y}_* = \hat{z}_1,$$

где $\bar{K}_1 = P^{-1} \bar{F}_2^T k_1 = k_1$. Функция $d_2(t)$ оценивается в виде

$$\hat{d}_2(t) = k_1 D_2^+ v_{eq}(t)$$

Для проверки работоспособности и эффективности полученного наблюдателя было проведено моделирование на примере электропривода второй степени подвижности (координата q_2) шестистепенного манипулятора

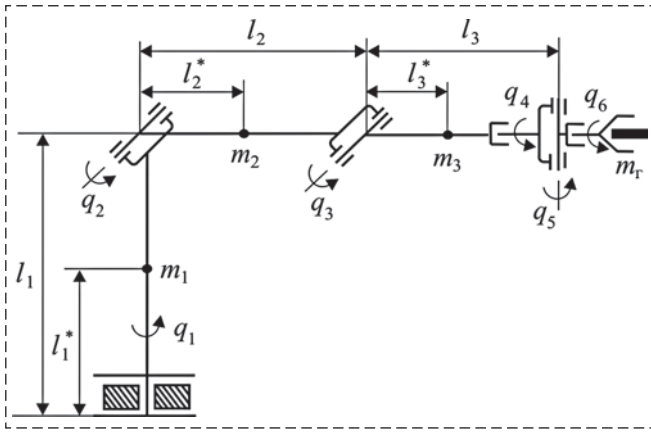


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора типа PUMA
Fig. 1. Cinematic scheme of PUMA manipulator

типа PUMA, показанного на рис. 1. На этом рисунке введены следующие обозначения: m_i — масса i -го звена; m_r — масса груза (или рабочего инструмента), находящегося в схвате; l_i — длина i -го звена; l_i^* — расстояние от шарнира вращения i -го звена до его центра масс; q_i — угол поворота i -го сочленения; $i = \overline{1,6}$ — номер сочленения манипулятора.

Для второй степени подвижности эффекты взаимовлияния в модели (4.1) описываются следующими уравнениями [22]:

$$\begin{aligned} H(t) &= J_{n2} + J_{n3} + m_2 l_2^{*2} + m_3 l_3^{*2} + (m_3 + m_r) l_2^2 + \\ &+ m_r l_3^2 + 2l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \cos q_3(t); \\ h(t) &= -2l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \dot{q}_3 \sin q_3(t); \\ M_B(t) &= [J_{n3} + m_3 l_3^{*2} + m_r l_3^2 + \\ &+ (m_3 l_3^* + m_r l_3) l_2 \cos q_3(t)] \ddot{q}_3(t) - \\ &- l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \dot{q}_3^2(t) \sin q_3(t) + \\ &+ g[m_2 l_2^* + (m_3 + m_r) l_2] \sin q_2(t) + \\ &+ g(m_3 l_3^* + m_r l_3) \sin(q_2(t) + q_3(t)) - \\ &- \frac{1}{2}[(J_{n2} - J_{s2} + m_2 l_2^{*2} + (m_3 + m_r) l_2^2) \sin(2q_2(t)) + \\ &+ (J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_r l_3^2) \sin(2(q_2(t) + q_3(t))) + \\ &+ 2l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \sin(2q_2(t) + q_3(t))] \dot{q}_1^2(t); \\ H^*(t) &= H(t)/i_r^2; \quad h^*(t) = h(t)/i_r^2; \\ M_B^*(t) &= M_B(t)/i_r, \end{aligned}$$

где J_{si} — момент инерции звена i ($i = \overline{1,3}$) относительно его продольной оси; J_{ni} — момент инерции i -го звена относительно поперечной оси, проходящей через его центр масс; g — ускорение свободного падения.

При моделировании принимались следующие значения параметров звеньев манипулятора в данном описании взаимовлияний: $m_1 = 35,8$ кг; $m_2 = 3,5$ кг; $m_3 = 3$ кг; $l_1 = 0,2$ м; $l_2 = 0,5$ м; $l_3 = 0,4$ м; $l_1^* = 0,1$ м; $l_2^* = 0,12$ м; $l_3^* = 0,1$ м; $J_{s1} = 0,32$ кг·м²; $J_{n2} = 0,12$ кг·м²; $J_{s2} = 0,0047$ кг·м²; $J_{s3} = 0,004$ кг·м²; $J_{n3} = 0,067$ кг·м²; $m_r = 1$ кг.

При моделировании были использованы следующие параметры электропривода: $R_m = 0,5$ Ом; $L_m = 0,0005$ Гн; $k_\omega = 0,04$ В·с; $k_m = 0,04$ Н·м/А; $J = 10^{-4}$ кг·м²; $i_r = 100$, $k_b = 0,005$ Н·м·с/рад, $M_{тр} = 0,02$ Н·м, $k_y = 100$. Для управления электроприводом использовался ПИД регулятор с коэффициентами $k_p = 10$, $k_i = 0,5$, $k_d = 1$ и самонастраивающееся корректирующее устройство. В качестве задающего использовался сигнал $q_2^*(t) = \sin t$. Другие звенья манипулятора перемещались по законам $q_1(t) = 2 \sin(1,5t)$ и $q_3(t) = \sin(2t)$.

Коэффициенты наблюдателя были выбраны следующим образом: $k_1 = 10^7$, $k_2 = 1$, $k_3 = 10^4$. Появление дефекта имитировалось увеличением параметров k_b и $M_{тр}$ на 50 % с момента $t = 3$ с. При этом наблюдателем идентифицировалась функция

$$\hat{M}(t) = -\hat{k}_b(t)x_2(t) - \hat{M}_{тр}(t)\text{sign}(x_2(t)),$$

где $\hat{k}_b(t) = 0,5k_b$ и $\hat{M}_{тр}(t) = 0,5M_{тр}$.

На рис. 2 показана реальное значение функции $\hat{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценка наблюдателем (кривая 2). На рис. 3 показана ошибка идентификации функции $\hat{M}(t)$.

Из рис. 2 и 3 видно, что максимальное значение ошибки идентификации после возник-

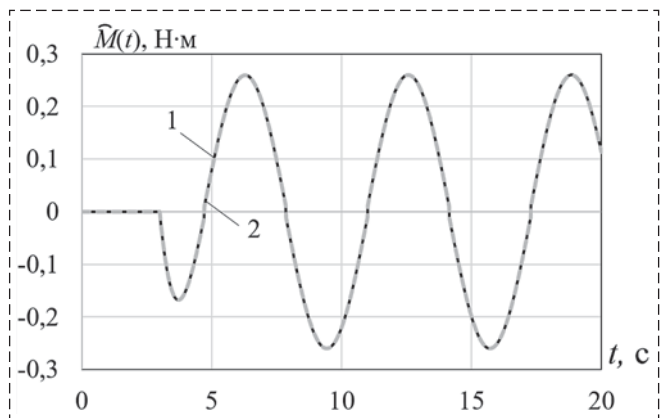


Рис. 2. Функция $\hat{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценка наблюдателем (кривая 2)

Fig. 2. Function $\hat{M}(t)$ (curve 1) and its estimation (curve 2)

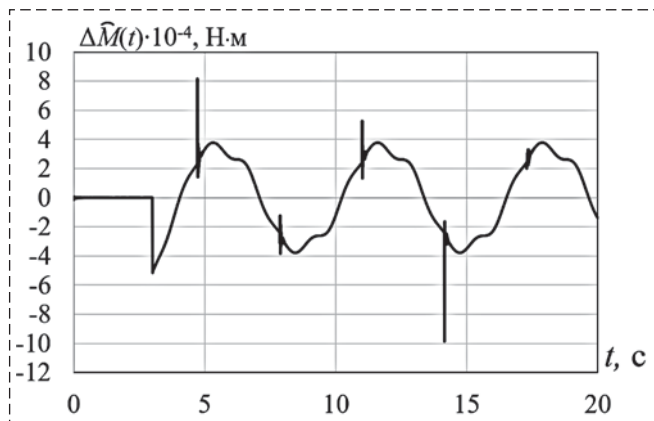


Рис. 3. Ошибка идентификации функции $\hat{M}(t)$
Fig. 3. Function $\hat{M}(t)$ estimation error

новения в электроприводе рассматриваемого дефекта не превышает 0,35 % от идентифицируемой величины $\hat{M}(t)$, что говорит о работоспособности и высокой эффективности синтезированного наблюдателя.

Заключение

В работе рассмотрена задача идентификации дефектов в нестационарных системах, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, в присутствии возмущений на основе наблюдателей, работающих в скользящем режиме. Скользящий наблюдатель строится на основе редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, обладающей избирательной чувствительностью по отношению к дефектам и возмущению. За счет введения такой модели и канонической формы описывающих ее матриц удалось упростить анализ условий возникновения скользящего режима и ослабить условия существования скользящих наблюдателей по сравнению с известными работами. Эффект ослабления указанных условий возник за счет того, что модель пониженной размерности может не иметь тех свойств, которые присутствуют в исходной системе и препятствуют возможности построения для нее скользящего наблюдателя. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода.

Список литературы

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.

3. Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Зуев А. В. Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 11. С. 728–733.
4. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Метод идентификации дефектов в нелинейных системах на основе скользящих наблюдателей // Изв. РАН. ТИСУ. 2021. № 1. С. 11–23.
5. Edwards C., Spurgeon S. On the development of discontinuous observers // Int. J. Control. 1994. V. 59. P. 1211–1229.
6. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer // Int. J. Control. 2004. Vol. 77. P. 622–629.
7. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // АиТ. 2020. № 2. С. 18–35.
8. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers // Automatica. 2007. Vol. 43. P. 1605–1614.
9. 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.
10. Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // Automatica. 2008. Vol. 44. P. 1859–1866.
11. 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.
12. 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.
13. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V. Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers // Int. J. Appl. Math. and Comp. Sci. 2020. Vol. 30, N. 4. P. 679–688.
14. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. On sliding mode observers for systems with unknown inputs // Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2017. Vol. 21. P. 638–656.
15. Fridman L., Levant A., Davila J. Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes // Int. J. Syst. Sci. 2007. Vol. 38. P. 773–791.
16. 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.
17. Alwi H., Edwards C., Tan C. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor faults // Automatica. 2009. Vol. 45. P. 1679–1685.
18. 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 // Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2014. Vol. 28. P. 1372–1397.
19. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. Robust fault tolerant control design for nonlinear systems not satisfying matching and minimum phase conditions // Int. J. Contr., Autom. and Syst. 2020. Vol. 18. P. 1–14.
20. 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.
21. Квекернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
22. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018.

Fault Identification in Non-Stationary Systems Based on Sliding Mode Observers

A. V. Zuev, alvzuev@yandex.ru, A. N. Zhirabok, zhirabok@mail.ru, V. F. Filaretov, filaretov@inbox.ru,
A. A. Protsenko, pro293133@gmail.com,
Institute of Marine Technology Problems, Vladivostok, 690950, Russian Federation,
Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,
Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, 690014, Russian Federation

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

Accepted on September 01, 2021

Abstract

The paper is devoted to the problem of fault identification in technical systems described by non-stationary nonlinear dynamic equations under unmatched disturbances. To solve the problem, sliding mode observers are used. The suggested approach is based on the model of the original system of minimal dimension having different sensitivity to the faults and disturbances in contrast to the traditional approaches to sliding observer design which are based on the original system. Additionally it is assumed that matrices describing such a model have the canonical form and are constant. The main purpose of using such a model is possibility to take into account the non-stationary feature of the systems. As a result, the model has stationary dynamic and non-stationary additional term that allows to promote sliding mode design. Besides, the new approach to design sliding mode observers is suggested. The peculiarity of this approach is that it does not require that original systems should be minimum phase and detectable. According to the traditional approaches stability of the observer is provided by minimum phase and detectability properties. In our approach, stability of the observer is achieved due to the canonical form of the matrices describing the model. In addition, the matching condition is not necessary. This allows to extend a class of systems for which sliding mode observers can be designed. Theoretical results are illustrated by practical example of electric servomotor.

Keywords: nonlinear systems, faults, identification, sliding mode observers

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation of Basic Researches, project no. 20-38-70161, in part project no. 19-08-00347, in part by President grant SP-3252.2019.5.

For citation:

Zuev A. V., Zhirabok A. N., Filaretov V. F., Protsenko A. A. Fault Identification in Non-Stationary Systems Based on Sliding Mode Observers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 625–633.

DOI: 10.17587/mau.22.625-633

References

1. Mironivskii L. A. Functional diagnosis in dynamic systems, Moscow-SPb., MGU-GRIF, 1998 (in Russian).
2. Utkin V. Sliding modes in control optimization. Berlin, Springer, 1992.
3. Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Approach to fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, no. 11, pp. 728–733 (in Russian).
4. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumsky A. E. Methods of fault identification in nonlinear dynamic systems based on sliding mode observers, *J. Computer and Systems Sciences Int.*, 2020, vol. 60, no. 1, pp. 9–21.
5. Edwards C., Spurgeon S. On the Development of Discontinuous Observers, *Int. J. Control*, 1994, vol. 59, pp. 1211–1229.
6. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer, *Int. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622–629.
7. 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 (in Russian).
8. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers, *Automatica*, 2007, vol. 43, pp. 1605–1614.
9. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems, *Math. Problems in Eng.*, 2012, vol. 2012, ID 451843, pp. 1–22.
10. Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation, *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1859–1866.
11. Chandra K., Alwi H., Edwards C. Fault reconstruction for a quadrotor using an LPV sliding mode observer, *Proc. 9th IFAC Symp. Safeprocess*, Paris, France, 2015, pp. 374–379.
12. 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, pp. 49–59.
13. 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.
14. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. On sliding mode observers for systems with unknown inputs, *Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2017, vol. 21, pp. 638–56.
15. Fridman L., Levant A., Davila J. Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes, *Int. J. Syst. Sci.*, 2007, vol. 38, pp. 773–791.
16. 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, pp. 3411–3416.
17. Alwi H., Edwards C., Tan C. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor faults, *Automatica*, 2009, vol. 45, pp. 1679–1685.
18. 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, *Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2014, vol. 28, pp. 1372–1397.
19. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. Robust fault tolerant control design for nonlinear systems not satisfying matching and minimum phase conditions, *Int. J. Contr., Autom. and Syst.*, 2020, vol. 18, pp. 1–14.
20. 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, pp. 290–295.
21. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear optimal control systems*, New York, Wiley, 1972.
22. Filaretov V. F., Zuev A. V., Gubankov A. S. Manipulators control when performing various technological operations, Moscow, Nauka, 2018 (in Russian).