

Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 681.518

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-79-90

А.В. Зуев, А.Н. Жирабок

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ*

Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации подводных аппаратов (ПА) за счет использования систем функционального диагностирования их двигателей, обеспечивающих обнаружение, локализацию и идентификацию возникающих незначительных дефектов. Для решения этой задачи в статье предложен новый метод, содержащий два основных этапа. На первом этапе осуществляется построение банка диагностических наблюдателей для обнаружения и локализации возникающих дефектов. При этом каждый наблюдатель строится по специальной процедуре таким образом, чтобы быть чувствительным к различному набору возможных дефектов. На втором этапе синтезируются дополнительные наблюдатели, работающие в скользящем режиме, для точной оценки величин дефектов. При этом, в отличие от существующих решений, предлагается использовать редуцированную (имеющую меньшую размерность) модель исходной системы при построении указанных наблюдателей. Это дает возможность уменьшить сложность получаемых наблюдателей по сравнению с известными работами, где строятся наблюдатели полного порядка. Результаты проведенных исследований показали работоспособность и высокое качество всех синтезированных наблюдателей. Во всех рассмотренных случаях удалось своевременно обнаружить факт появления типовых дефектов, а также обеспечить идентификацию их величин. На основе рассмотренного метода построения систем диагностирования двигателей могут быть созданы высоконадежные системы управления ПА.

Двигатель ПА; дефект; переменные параметры; диагностирование; идентификация; скользящий наблюдатель.

A.V. Zuev, A.N. Zhirabok

DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THRUSTERS OF UNDERWATER VEHICLES

The aim of the study is to increase the efficiency of operation of underwater vehicles (UVs) by using systems of functional diagnosis of their thrusters, by providing detection, localization and identification of minor faults. To solve this problem, the article proposes a new method containing two main stages. At the first stage, a bank of diagnostic observers is built to detect and localize emerging faults. At the same time, each observer is constructed according to a special procedure in such a way to be sensitive to different set of possible faults. At the second stage, additional observers working in the sliding mode are synthesized to accurately estimate the fault values. At the same time, in contrast to existing solutions, it is proposed to use a reduced (having a smaller dimension) model of the original system when constructing these sliding mode observers. This makes it possible to reduce the complexity of the obtained observers in comparison with the known meth-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00143).

ods, where full-order observers are built. The results of the research showed the efficiency and high quality of all synthesized observers. In all the considered cases, it was possible to detect the occurrence of typical faults, as well as to ensure the identification of their values. Highly reliable UV control systems can be created on the basis of the considered method.

UVs thruster; fault; variable parameters; diagnosis; identification; sliding mode observer.

Введение. Одной из важнейших задач, возникающих при выполнении подводными аппаратами (ПА) различных миссий, является обеспечение их сохранности и неизменной работоспособности. К числу компонентов ПА, от которых в существенной степени зависит их способность выполнять поставленные задачи, относятся их движители, обеспечивающие отработку предписанных траекторий движения. Появление любых дефектов, вызывающих отказ или изменение параметров движителей, приводит к существенному снижению показателей качества управления ПА, различным аварийным ситуациям или даже потере дорогостоящих аппаратов.

Одним из перспективных путей повышения эффективности эксплуатации ПА является использование методов функционального диагностирования [1, 2] для обнаружения и локализации возникающих дефектов, а также методов идентификации [3], обеспечивающих точную оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и оценку отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных возникновением указанных дефектов. В дальнейшем полученные оценки могут быть использованы для устранения последствий возникающих дефектов [4, 5] (аккомодации к ним).

В настоящее время для оценки технического состояния различных элементов ПА оснащаются контрольно-аварийными системами, в задачи которых входит выявление критических и аварийных ситуаций [6, 7]. Однако, как правило, существующие системы обеспечивают только общий контроль работоспособности и не позволяют осуществлять обнаружение дефектов, а также проводить оценку ошибок в показаниях датчиков и отклонение параметров движителей от номинальных значений.

В настоящее время существует несколько подходов к построению специальных систем диагностирования движителей ПА. В частности, в работах [8–11] представлены методы, основанные на построении наблюдателей с использованием моделей динамики ПА. Однако поскольку ПА описываются очень сложными многосвязными нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными и неопределенными параметрами, то получаемые наблюдатели являются громоздкими и не позволяют обеспечить качественное обнаружение и идентификацию дефектов при высокоскоростном движении аппаратов. Кроме того, многие из этих методов требуют использования специальных тестовых режимов движения ПА [11].

Можно выделить методы диагностирования, основанные на использовании нейронных сетей [12, 13]. Недостатком этих методов является необходимость сложной процедуры обучения при использовании специальных тестовых движений ПА.

В работе [14] рассмотрен подход к построению систем диагностирования и аккомодации к дефектам в движителях ПА, предполагающий отключение неисправного движителя с последующим распределением его тяги между оставшимися движителями. Недостатком такого подхода является необходимость наличия избыточного количества движителей у ПА.

В настоящее время, одним из перспективных подходов к обнаружению и идентификации дефектов является использование диагностических наблюдателей, работающих в скользящем режиме [15]; для простоты будем далее называть такие наблю-

датели скользящими. Сейчас скользящие наблюдатели (СН) используются для решения задач идентификации дефектов в линейных [16] и нелинейных [17] системах, для обеспечения отказоустойчивого управления [18]. Однако во всех этих работах на исходную систему накладывается ряд существенных ограничений, а также предполагается построение наблюдателей полного порядка, что усложняет процедуру точной идентификации дефектов в двигателях ПА. Кроме того, существующие СН, как правило, могут быть построены для обнаружения только одиночных дефектов.

Проведенный анализ показал, что ввиду высокой сложности реализации получаемых наблюдателей или низкой точности идентификации дефектов большинство из указанных методов и подходов не может быть эффективно использовано при синтезе системы функционального диагностирования двигателей ПА.

Описание объекта диагностирования и постановка задачи. Рассмотрим модель двигателя ПА, построенного на основе электропривода постоянного тока, имеющего датчики угловой скорости и тока. Предполагается, что при автономном функционировании ПА в их двигателях возможно возникновение следующих типовых дефектов: 1) дефект в датчике угловой скорости, приводящий к появлению постоянной или переменной ошибки $\tilde{\omega}(t)$ в его показаниях; 2) перегрев двигателя или замыкание нескольких витков обмотки цепи якоря, что приводит к изменению номинального значения электрического сопротивления R на величину $\tilde{R}(t)$; 3) появление дополнительного внешнего моментного воздействия $\tilde{M}(t)$ на валу двигателя, обусловленного, например, намоткой травы на винт.

Наличие указанных дефектов существенно снижает качественные показатели работы двигателей и точность движения ПА по предписанным траекториям. При наличии этих дефектов разомкнутую цепь каждого электродвигателя в матричной форме можно описать дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + W(t) + Dd(t), \\ y(t) &= Cx(t) + D_s d_s(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -k_b/J & k_m/J \\ -k_w/L & -R/L \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_y/L \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad W(t) = \begin{bmatrix} -M(t)/J \\ 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$D_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad x(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = U(t); \quad d(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix};$$

$$d_1(t) = -\tilde{M}(t)/J; \quad d_2(t) = -\tilde{R}(t)I(t)/L; \quad d_s(t) = \tilde{\omega}(t);$$

k_b – коэффициент вязкого трения; J – момент инерции вращающихся частей двигателя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; $I(t)$, L – ток и индуктивность цепи якоря электродвигателя, соответственно; k_w – коэффициент противо-э.д.с.; k_y – коэффициент усиления; k_m – коэффициент крутящего момента; $\omega(t)$ – скорость вращения ротора; $M(t) = (k_1 + k_2\lambda + k_3\lambda^2 + k_4\lambda^3)\rho|\omega(t)|\omega(t)D^5$ – момент нагрузки, обусловлен-

ный воздействием вязкой среды на винт; ρ – плотность воды; D – диаметр винта; $\lambda = \eta(t) / \omega(t)D$; $\eta(t)$ – скорость движения ПА; k_1, k_2, k_3, k_4 – известные постоянные коэффициенты; $U(t)$ – напряжение на входе усилителя мощности.

При функционировании ПА (особенно в автономных режимах) каждый дефект в любом из движителей независимо от причины его появления должен быть своевременно обнаружен, а его влияние на качественную работу движителя устранено.

Таким образом, в данной работе ставится и решается задача создания метода синтеза систем функционального диагностирования для движителей ПА, обеспечивающих своевременное обнаружение и локализацию возникающих дефектов (т.е. определение факта и времени появления в системе (1) конкретных функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$), а также идентификацию величины ошибки $\tilde{w}(t)$ в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости движителя, и величин отклонений параметров движителей от их номинальных значений $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{M}(t)$. Причем программная реализация создаваемой системы должна обладать минимальной вычислительной сложностью.

Для решения поставленной задачи в работе предложен новый метод, включающий два основных этапа.

1. Построение банка диагностических наблюдателей (ДН) для обнаружения и локализации возникающих дефектов. При этом каждый наблюдатель здесь строится по специальной процедуре таким образом, чтобы быть чувствительным к различному набору функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$.

2. Построение дополнительных СН для точной оценки величины ошибки в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости, и величин отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов. При этом, в отличие от существующих решений, предлагается использовать редуцированную (имеющую меньшую размерность) модель исходной системы (1) при построении указанных наблюдателей. Это дает возможность уменьшить сложность СН по сравнению с известными работами [16, 18], где строятся наблюдатели полного порядка. Далее последовательно будут рассмотрены указанные этапы синтеза.

Построение ДН для обнаружения и локализации дефектов. Для обнаружения и локализации возникающих дефектов строится банк ДН, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= A_*x_*(t) + B_*u(t) + W_*(t) + J_*y(t) + K_*e_y(t), \\ y_*(t) &= C_*x_*(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где x_* – вектор состояния ДН; $e_y(t) = R_*y(t) - y_*(t)$ – ошибка по выходу (при отсутствии дефектов $e_y(t) = 0$, а при их появлении $e_y(t) \neq 0$); A_* , B_* , C_* , W_* , K_* , R_* и J_* – вектора и матрицы, подлежащие определению; y_* – вектор выхода ДН.

Предполагается [2], что при отсутствии дефектов выполняются равенства $x_*(t) = \Phi x(t)$ и $y_*(t) = R_*y(t)$ для некоторых матриц Φ и R_* , удовлетворяющих условиям

$$\Phi A = A_*\Phi + J_*C, \quad R_*C_* = C\Phi, \quad B_* = \Phi B, \quad W_*(t) = \Phi W(t). \quad (3)$$

Далее рассмотрим процедуру построения ДН (2), чувствительных различного набору функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$. Отметим, что чувствительность к функциям $d_1(t)$ и $d_2(t)$ задается условием $\Phi D_j \neq 0$ ($j = \overline{1,2}$), чувствительность к ошибкам в показаниях датчика скорости – условием $J_* D_s \neq 0$ или $R_* D_s \neq 0$.

Для решения задачи матрицы A_* и C_* размеров $k \times k$ и $1 \times k$ (где k – размерность ДН) соответственно ищутся в канонической форме:

$$A_* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad C_* = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0].$$

В этом случае, как показано в [2], уравнения (3) могут быть приведены к одному уравнению

$$R_* C A^k = J_{*1} C A^{k-1} + J_{*2} C A^{k-2} + \dots + J_{*k} C, \quad (4)$$

где J_{*i} – i -я строка матрицы J_* .

Для дальнейшего построения ДН необходимо определить матрицы B_* , W_* , J_* , Φ и вектор R_* по следующему алгоритму.

1. Принять $k = 1$.

2. Решить уравнение (4). Отметим, что фактически это уравнение является системой линейных алгебраических уравнений, при этом количество переменных может быть больше количества уравнений. В таком случае некоторые элементы вектора R_* и матрицы J_* будут являться свободными переменными и могут быть подобраны исходя из необходимости обеспечения чувствительности либо нечувствительности ДН к определённым функциям $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$.

Если решения уравнения (4) не существует, положить $k := k + 1$ и вернуться к п.1.

3. Определить строки матрицы Φ по соотношениям

$$\Phi_1 = R_* C, \quad \Phi_{i+1} = \Phi_i A - J_{*i} C, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

4. Определить матрицы B_* и W_* по соотношениям:

$$B_* = \Phi B, \quad W_*(t) = \Phi W(t).$$

5. Выбрать матрицу K_* так, чтобы $A_{**} = A_* - K_* C_*$ стала устойчивой матрицей. Поскольку матрицы A_* и C_* ищутся в каноническом виде, матрица K_* всегда существует.

В результате использования предложенной процедуры для модели ПА (1) были синтезированы следующие ДН, описанные ниже матрицами:

1) ДН₁ первого порядка, чувствительный к $d_2(t)$ и $d_s(t)$ и инвариантный к $d_1(t)$:

$$A_* = 0, \quad C_* = 1, \quad R_* = \Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J_* = \begin{bmatrix} -k_w/L & -R/L \end{bmatrix}, \\ B_* = k_y/L, \quad W_*(t) = 0, \quad K_* = 0.1; \quad (5)$$

2) ДН₂ первого порядка, чувствительный к $d_1(t)$ и $d_s(t)$ и инвариантный к $d_2(t)$:

$$A_* = 0, \quad C_* = 1, \quad R_* = \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_* = 0, \\ J_* = \begin{bmatrix} -k_b/J & k_m/J \end{bmatrix}, \quad W_*(t) = -M(t)/J, \quad K_* = 0.1; \quad (6)$$

3) ДН₃ второго порядка, чувствительный к $d_1(t)$ и $d_2(t)$ и инвариантный к $d_s(t)$:

$$A_* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J_* = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_b}{J} - \frac{R}{L} \\ 0 & -\frac{k_m k_w}{JL} - \frac{k_b R}{JL} \end{bmatrix}, \quad K_* = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ K_* = \begin{bmatrix} 200 \\ 100 \end{bmatrix}, \quad B_* = \begin{bmatrix} k_y/L \\ k_b k_y/JL \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_w/L & k_b/J \end{bmatrix}, \\ W_*(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ M(t)k_w/LJ \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Построенные наблюдатели ДН₁, ДН₂ и ДН₃ позволяют осуществлять определение факта и времени появления неизвестных ненулевых функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_s(t)$ в системе (1). Решение о локализации конкретного дефекта принимается на основе матрицы синдромов S , значениями которой являются символы 0 и 1. Если ошибка по выходу конкретного ДН чувствительна к определенному дефекту, то на пересечении строки, соответствующей этой невязке матрицы S и ее столбца, соответствующего выявленному дефекту, ставится 1. В противном случае – 0 [2]:

$$S = \begin{matrix} & d_1(t) & d_2(t) & d_s(t) \\ e_{y1}(t) & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ e_{y2}(t) & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ e_{y3}(t) & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Построение дополнительных СН. Решение задачи точной оценки величины ошибки в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости движителя, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов, предлагается осуществлять с помощью дополнительных СН. При этом указанные наблюдатели должны строиться на основе редуцированных моделей [19–21] исходной системы (1), что позволит снизить сложность реализации СН по сравнению с известными работами [16, 18].

Анализ матрицы синдромов S показывает, что величины неизвестных функций $d_1(t)$ и $d_2(t)$ могут быть определены с использованием ДН₂ и ДН₁, соответственно. Таким образом, целесообразно осуществлять построение редуцированных моделей исходной системы, беря за основу именно эти наблюдатели. В общем виде полученные модели первого порядка будут иметь вид [20]

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi Dd(t), \\ y_*(t) &= x_*(t).\end{aligned}\quad (8)$$

СН для модели (8) ищется как

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi Dv(t) + K_*\hat{e}_y(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t),\end{aligned}\quad (9)$$

где

$$v(t) = \begin{cases} g \frac{\hat{e}_y(t)}{\|\hat{e}_y(t)\|}, & \text{если } \hat{e}_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\hat{e}_y(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t).$$

В работе [20] показано, что при выборе скаляра $g > \|d(t)\|$ уравнение для ошибки оценивания асимптотически устойчиво, т.е. ошибка оценивания $\hat{e}(t) = x_*(t) - \hat{x}_*(t) \rightarrow 0$ за конечное время. При этом величина $d(t)$ оценивается с высокой степенью точности с помощью следующего выражения:

$$d(t) = v_3(t) = g \frac{\hat{e}_y(t)}{\|\hat{e}_y(t)\| + \delta},$$

где δ – малое положительное число [16].

Таким образом, с учетом (5) и (6) были получены следующие СН:

1) СН₁ для идентификации величины $\tilde{M}(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= -\frac{k_B}{J} y_1(t) + \frac{k_M}{J} y_2(t) - \frac{M(t)}{J} + 0.1\hat{e}_y(t) + v_3(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_1(t) - \hat{y}_*(t), \\ g &= 100, \quad \delta = 0.01, \quad \tilde{M}(t) = -v_3(t)J;\end{aligned}\quad (10)$$

2) СН₂ для идентификации величины $\tilde{R}(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= -\frac{k_w}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + 0.1\hat{e}_y(t) + v_3(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_2(t) - \hat{y}_*(t), \\ g &= 5000, \quad \delta = 1, \quad \tilde{R}(t) = -\frac{v_3(t)L}{I(t)}.\end{aligned}\quad (11)$$

Идентификация величины функции $d_s(t)$, а следовательно, и оценка ошибки в показаниях датчика скорости движителя ПА может быть проведена с использованием следующей редуцированной модели [21], построенной на основе ДН₁:

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) - J_*D_s d_s(t), \\ y_*(t) &= x_*(t).\end{aligned}\quad (12)$$

По аналогии СН₃ для модели (12), обеспечивающий оценку величины $\tilde{\omega}(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= -\frac{k_w}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + 0.1 \hat{e}_y(t) + \frac{k_w}{L} v_3(t), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t), \quad \hat{e}_y(t) = y_2(t) - \hat{y}_*(t), \\ g &= 10, \quad \delta = 1, \quad \tilde{\omega}(t) = v_3(t).\end{aligned}\quad (13)$$

Таким образом, за счет использования СН₁, СН₂ и СН₃ удается обеспечить оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением дефектов. Важно отметить, что использование редуцированных моделей (8) и (12) позволило обеспечить построение простых наблюдателей первого порядка.

Структурная схема синтезированной системы функционального диагностирования движителей ПА (см. (5)–(7), (10), (11) и (13)) представлена на рис. 1.

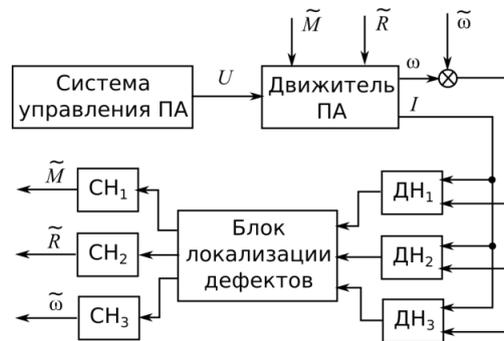


Рис. 1. Структурная схема системы функционального диагностирования движителей ПА

Результаты численных исследований. Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого метода синтеза было проведено моделирование работы системы функционального диагностирования движителя ПА со следующими параметрами: $k_b = 67.5610 \cdot 10^{-5}$ Нмс/рад; $J = 0,025$ кгм²; $R = 0.65$ Ом; $L = 0.00026$ Гн; $k_w = 0.135$ Вс/рад; $k_y = 27.71$; $k_m = 0.135$ Нм/А; $D = 0.178$ м; $k_1 = 0.015$; $k_2 = 0.02$; $k_3 = 0.0002$; $k_4 = -0.02$.

На движитель подавалось управление $U(t) = 1,5 + \sin(t)$, а одиночные дефекты имитировались введением внешнего момента $\tilde{M}(t) = 0.2 \sin((t-3)\pi/4)$ Нм в период времени 3÷7 с, плавным изменением величины активного сопротивления на 0.1 Ом в период времени 5÷10 с, а также введением постоянной ошибки $\tilde{\omega}(t) = 0.2$ рад/с в показания датчика скорости в период времени 4÷10 с.

На рис. 2 представлены графики функции $\tilde{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценки (кривая 2) с помощью предложенных наблюдателей.

На рис. 3 и 4 представленные аналогичные графики для функций $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$. Из представленных рисунков можно видеть, что построенные наблюдатели позволяют своевременно определить моменты времени появления ошибок $\tilde{M}(t)$, $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$, а также обеспечить достаточно точную оценку величин этих ошибок. Ошибка идентификации во всех трех случаях не превышала 0.1 %

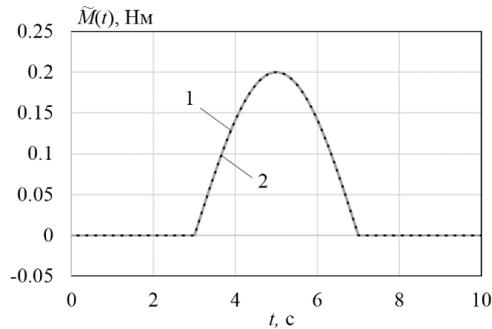


Рис. 2. Функция $\tilde{M}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

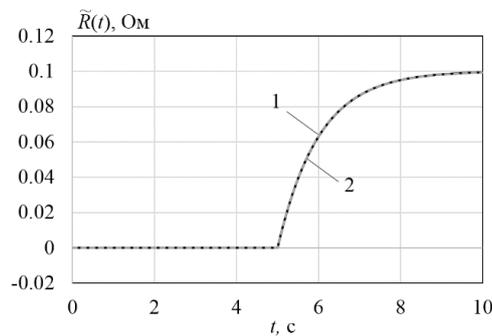


Рис. 3. Функция $\tilde{R}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

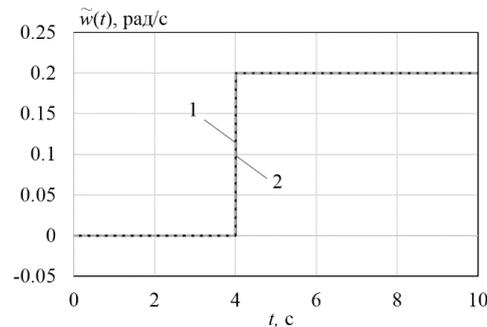


Рис. 4. Функция $\tilde{\omega}(t)$ (кривая 1) и результат ее идентификации (кривая 2)

Таким образом, результаты проведенных исследований показали безусловную работоспособность и высокое качество синтезированных наблюдателей. Во всех рассмотренных случаях удалось своевременно обнаружить факт появления дефекта, а также обеспечить определение его величины. На основе рассмотренного подхода к построению систем диагностирования двигателей ПА могут быть созданы высоконадежные системы управления ПА.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. Синтезированные с помощью предложенного в работе двухэтапного метода системы функционального диагностирования двигателей ПА достаточно просты и обладают невысокой вычислительной сложностью, что позволяет обеспечить их реализацию на типовых бортовых вычислителях ПА.

Построенные системы обеспечивают не только своевременное обнаружение и локализацию возникающих типовых дефектов с помощью банка ДН, но также точную оценку величин ошибок в сигналах, получаемых от датчиков, и отклонений параметров движителей от их номинальных значений, обусловленных появлением этих дефектов. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и высокое качество синтезированных наблюдателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем. – М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. *Шумский А.Е., Жирабок А.Н.* Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. – Владивосток: ДВГТУ, 2009.
3. *Simani S., Fantuzzi C., Patton R.* Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
4. *Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M.* Diagnosis and Fault-Tolerant Control. – Berlin: Springer-Verlag, 2006.
5. *Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zuev A., Protchenko A.* The development of the faults accommodation system for actuators of multilink manipulators // Proc. of the 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. – 2012. – P. 575-578.
6. *Chirikjian G.S.* Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations // Distributed Autonomous Robotic Systems. – 2009. – No. 8. – P. 273-281.
7. *Инзарцев А.В., Грибова В.В., Клеуцев А.С.* Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 2 (20). – С. 4-11.
8. *Zhang M., Wu J., Wang Y.* Simultaneous Faults Detection and location of Thrusters and Sensors for Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of the Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. – 2011. – P. 504-507.
9. *Zhu D., Sun B.* Information fusion fault diagnosis method for unmanned underwater vehicle thrusters // IET Electrical Systems in Transportation. – 2013. – Vol. 3, No. 4. – P. 102-111.
10. *Wang J.* Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN // Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2012. – P. 2931-2934.
11. *Zhao B., Skjetne R., Blanke M., Dukan F.* Particle Filter for Fault Diagnosis and Robust Navigation of Underwater Robot // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – Vol. 22, No. 6. – P. 2399-2407.
12. *Wang J., Wu G., Wan L., Sun Y., Jiang D.* Recurrent Neural Network Applied to Fault Diagnosis of Underwater Robots // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. – 2009. – P. 593-598.
13. *Wang J.-G.* Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with Neural Network // Proc. of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – 2012. – P. 1613-1617.
14. *Sarkar N., Podder T.K., Antonelli G.* Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2002. – Vol. 18, No. 2. – P. 223-233.
15. *Уткин В.И.* Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974.
16. *Edwards C., Spurgeon S., Patton R.* Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 541-553.
17. *He J., Zhang C.* Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-22.
18. *Alwi H., Edwards C.* Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation // Automatica. – 2008. – Vol. 44. – P. 1859-1866.
19. *Жирабок А.Н., Зувев А.В., Шумский А.Е.* Методы диагностирования линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 6. – С. 73-89.

20. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 2. – С. 18-35.
21. 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.

REFERENCES

1. Mironovskiy L.A. Funktsional'noe diagnostirovanie dinamicheskikh system [Functional diagnosis of dynamic systems]. Moscow – Saint Petersburg: MGU-GRIF, 1998.
2. Shumskiy A.E., Zhirabok A.N. Metody i algoritmy diagnostirovaniya i otkazoustoychivogo upravleniya dinamicheskimi sistemami [Methods and algorithms of diagnosis and fault tolerant control of dynamic systems]. Vladivostok: DVG TU, 2009.
3. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
4. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. – Berlin: Springer-Verlag, 2006.
5. Filaretov V.F., Zhirabok A.N., Zuev A., Protchenko A. The development of the faults accommodation system for actuators of multilink manipulators, *Proc. of the 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2012, pp. 575-578.
6. Chirikjian G.S. Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2009, No. 8, pp. 273-281.
7. Inzartsev A.V., Gribova V.V., Kleshchev A.S. Intellektual'naya sistema dlya formirovaniya adekvatnogo povedeniya avtonomnogo podvodnogo robota v avariynkh situatsiyakh [Intelligent system for forming the adequate behavior of autonomous underwater robot in emergency situations], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2015, No. 2 (20), pp. 4-11.
8. Zhang M., Wu J., Wang Y. Simultaneous Faults Detection and location of Thrusters and Sensors for Autonomous Underwater Vehicle, *Proc. of the Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2011, pp. 504-507.
9. Zhu D., Sun B. Information fusion fault diagnosis method for unmanned underwater vehicle thrusters, *IET Electrical Systems in Transportation*, 2013, Vol. 3, No. 4, pp. 102-111.
10. Wang J. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN, *Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2012, pp. 2931-2934.
11. Zhao B., Skjetne R., Blanke M., Dukan F. Particle Filter for Fault Diagnosis and Robust Navigation of Underwater Robot, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, Vol. 22, No. 6, pp. 2399-2407.
12. Wang J., Wu G., Wan L., Sun Y., Jiang D. Recurrent Neural Network Applied to Fault Diagnosis of Underwater Robots, *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2009, pp. 593-598.
13. Wang J.-G. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with Neural Network, *Proc. of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2012, pp. 1613-1617.
14. Sarkar N, Podder T.K., Antonelli G. Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, Vol. 18, No. 2, pp. 223-233.
15. Utkin V.I. Skol'zyashchie rezhimy i ikh primeneniye v sistemakh s peremennoy strukturoy [Sliding modes and their application in systems with variable structure]. Moscow: Nauka, 1974.
16. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation, *Automatica*, 2000, Vol. 36, pp. 541-553.
17. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, Vol. 2012, pp. 1-22.
18. Alwi H., Edwards C. Fault Tolerant Control Using Sliding Modes with On-line Control Allocation, *Automatica*, 2008, Vol. 44, pp. 1859-1866.
19. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Metody diagnostirovaniya lineynykh sistem na osnove skol'zyashchikh nablyudateley [Methods for diagnosing linear systems based on sliding observers], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2019, No. 6, pp. 73-89.

20. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Diagnostirovanie lineynykh dinamicheskikh sistem: podkhod na osnove skol'zyashchikh nablyudateley [Diagnostics of linear dynamic systems: an approach based on sliding observers], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2020, No. 2, pp. 18-35.
21. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Identifikatsiya defektov v datchikakh tekhnicheskikh sistem s ispol'zovaniem skol'zyashchikh nablyudateley [Identification of defects in sensors of technical systems using sliding observers], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology], 2019, No. 10, pp. 21-28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Д.А. Юхимец.

Зуев Александр Валерьевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: zuev@dvo.ru; г. Владивосток, ул. Радио, 5; тел.: 89149617735; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Жиравок Алексей Нилович – e-mail: zhirabok@mail.ru; тел.: 89242345895; д.т.н.; профессор; в.н.с.

Zuev Aleksander Valer'evich – Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; e-mail: zuev@dvo.ru; 5, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia; phone: +79149617735; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Zhirabok Alexey Nilovich – e-mail: zhirabok@mail.ru; phone: +79242345895; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 007.52, 519.878, 519.1, 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-90-98

Д.В. Березников, А.А. Закиев, Е.А. Магид

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ КОЛЁСНОГО РОБОТА ПРИ ПОТЕРЕ СВЯЗИ С УДАЛЕННЫМ ОПЕРАТОРОМ*

Данная работа посвящена увеличению уровня автономности мобильных роботов в случаях потери связи с оператором, осуществляющим удаленное управление роботом. Актуальность данной задачи растет, поскольку мобильные роботы находят все больше применений в различных задачах. При работе в опасной для человека среде, например, во время поисково-спасательной операции, требуется надежный способ сохранить робота в случаях потери связи. Разрыв связи с роботом, который используется в недоступной для человека среде, означает потерю робота как функциональной единицы. Причиной возникновения подобных ситуаций становится несовершенство технологий связи, свойства окружающей среды или человеческий фактор. Данная проблема может возникнуть как при проводной, так и беспроводной связи между оператором и роботом. Поэтому робот должен обладать возможностью самостоятельно принимать решения в соответствии с поставленной задачей в случае потери прямого контроля со стороны оператора. Для этого робот должен иметь возможность обнаруживать потерю связи с оператором и возвращаться в начальную точку пути без вмешательства человека. В данной статье мы представляем разработанный алгоритм автоматического обнаружения разрыва сетевого соединения робота и алгоритм автономного возврата робота. В отличие от существующих решений, разработанный алгоритм не требует дополнительного оборудования или настройки программного обеспечения на стороне оператора. Алгоритм обнаружения разрыва сетевого соединения робота использует анализ TCP/IP пакетов, что делает его универсальным для роботов, управляемых по сетям Wi-Fi. Для автономного возвращения робота используются методы одновременной

* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований проект № 19-58-70002.