

В. Ф. Филаретов^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaret@iacp.dvo.ru,

А. В. Зуев³, канд. техн. наук, доц., зав. лаб., zuev@dvo.ru,

А. Н. Жирабок^{2, 3}, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru,

А. А. Проценко³, мл. науч. сотр., protsenkoAIAn@yandex.ru,

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,

³ Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток

Разработка системы аккомодации к дефектам в движителях подводных роботов¹

Обсуждается решение задачи повышения надежности эксплуатации подводных роботов различного вида и назначения за счет использования систем аккомодации, обеспечивающих компенсацию последствий дефектов, появляющихся в движителях в процессе их работы. Рассмотрены дефекты, приводящие к ошибкам в показаниях датчиков угловых скоростей вращения электроприводов движителей; перегрев электродвигателей или замыкание нескольких витков обмоток электрических цепей их якорей, изменяющие активные сопротивления этих якорей; появление дополнительных внешних моментных воздействий на валах движителей, в том числе при намотке водорослей на гребные винты. Предложен новый метод построения систем аккомодации, содержащий три этапа. На первом осуществляется обнаружение и локализация возникающих дефектов с помощью банка диагностических наблюдателей, в котором каждый наблюдатель синтезируется таким образом, чтобы формируемая им невязка была чувствительна к появлению различных комбинаций возможных дефектов. Это позволяет не только точно определить каждый конкретный дефект, но и на втором этапе провести точную оценку ошибок датчиков и отклонений параметров движителей от их номинальных значений. Для этого на втором этапе вводятся дополнительные наблюдатели с переменной структурой, построенные на основе редуцированных (имеющих меньшую размерность) моделей исходной системы. Это позволяет значительно уменьшить сложность процедуры идентификации дефектов и, тем самым, обеспечить их реализацию на бортовых ЭВМ. На третьем этапе осуществляется формирование дополнительных управляющих воздействий, подаваемых на движители роботов, которые обеспечивают стабилизацию их динамических свойств и качественных показателей на номинальном уровне при возникновении перечисленных дефектов. Для этого используются методы построения самонастраивающихся корректирующих устройств, в которые вводятся полученные на предыдущем этапе оценки дефектов.

Приведены результаты математического моделирования, которые подтвердили работоспособность и высокую эффективность использования синтезированных систем аккомодации для движителей подводных роботов.

Ключевые слова: подводный робот, движитель, дефект, наблюдатель, диагностирование, идентификация, аккомодация

Введение

При автономной эксплуатации различных подводных роботов (ПР) актуальной задачей является обеспечение их сохранности и неизменной работоспособности [1]. Движители ПР, обеспечивающие отработку предписанных траекторий и режимов движения, являются одними из самых нагруженных и критически важных устройств, определяющих способность ПР выполнять поставленные задачи. Появление различных дефектов, вызывающих отказ или изменение параметров движителей, а также появление ошибок в их датчиках, приводит к снижению точности отработки заданных траекторий, различным аварийным ситуациям или даже к потере дорогостоящих роботов.

В настоящее время для оценки технического состояния и выявления возможных неисправностей бортового оборудования ПР оснащаются контрольно-аварийными системами [2, 3]. Однако эти системы, как правило, обеспечивают только общий контроль работоспособности и не позволяют проводить оценку ошибок в показаниях датчиков движителей и отклонений их параметров от номинальных значений, обусловленных появлением дефектов, а также осуществлять компенсацию их последствий.

Известны подходы к диагностированию, предполагающие использование специальных диагностических наблюдателей (ДН) для движителей ПР, на основе которых возможно построение систем аккомодации к дефектам (т. е. формирование специальных дополнительных управляющих сигналов, обеспечивающих компенсацию негативных последствий от возникающих дефектов [4]). В частности, в работах [5–8] представлены методы аккомодации, основанные

¹Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 20-38-70161 и 19-08-00347, а также Стипендии Президента РФ (СП-3252.2019.5).

на построении ДН с использованием моделей динамики ПР при их движении в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Однако поскольку не всегда удастся точно определить параметры ПР, то появляются ненулевые невязки, приводящие к ложным срабатываниям ДН, а также к значительным ошибкам идентификации дефектов и компенсации их последствий. Кроме того, указанные методы не применимы при движениях ПР по сложным пространственным траекториям с высокой скоростью, поскольку в этом случае ПР описывается уже сложными многосвязными нелинейными дифференциальными уравнениями с существенно переменными и неопределенными параметрами. Многие из перечисленных методов требуют использования специальных тестовых режимов движения ПР [8], которые не всегда допустимы.

Некоторые методы диагностирования и аккомодации используют нейронные сети [9, 10], но при этом требуется длительная процедура обучения, также использующая специальные тестовые движения ПР.

В работе [11] рассмотрен подход к построению систем аккомодации к дефектам в движителях ПР, предполагающий отключение неисправного движителя с последующим распределением его тяги между другими движителями. Недостатком такого подхода является необходимость использования избыточного числа движителей у ПР.

Таким образом, проведенный анализ показал, что ввиду высокой сложности реализации ДН, низкой точности идентификации и компенсации дефектов, а также необходимости использования длительных процедур обучения, включающих тестовые режимы движения, существующие методы и подходы не могут быть эффективно использованы при синтезе систем аккомодации к дефектам в движителях ПР. Поэтому задача разработки нового легко реализуемого и эффективного метода построения систем аккомодации по-прежнему остается важной и актуальной.

1. Постановка задачи

Поскольку в любом из движителей ПР независимо от причины появления каждый дефект должен быть своевременно обнаружен, а его влияние на качественную работу робота устранено, то в статье поставлена и решена задача создания нового метода синтеза систем аккомодации к различным дефектам в движителях ПР, обеспечивающих своевременное обнаружение и нейтрализацию дефектов.

2. Описание математической модели движителей ПР

Рассмотрим движители ПР, построенные на основе электродвигателя постоянного тока, имеющего датчики угловой скорости и тока [1]. В этих движителях возможно возникновение нескольких дефектов (под дефектом понимается каждое отдельное несоответствие объекта заданным требованиям): 1) дефект в датчике угловой скорости, приводящий к появлению постоянной или переменной ошибки $\tilde{\omega}(t)$ в его показаниях; 2) нагрев двигателя или замыкание нескольких витков обмотки цепи его якоря, приводящие к изменению номинального значения электрического сопротивления R на величину $\tilde{R}(t)$; 3) появление неизвестного внешнего моментного воздействия $\tilde{M}(t)$ на валу двигателя, в том числе при намотке водорослей на гребной винт.

С учетом этих типовых дефектов разомкнутую цепь каждого электродвигателя в матричном виде можно описать системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + W(t) + Dd(t); \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_s \tilde{\omega}(t),$$

где $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ — матрица динамических свойств движителя ПР; $a_{11} = -k_b/J$; $a_{12} = k_m/J$; $a_{21} = -k_\omega/L$; $a_{22} = -R/L$; $x(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}$ — вектор состояния; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_y/L \end{bmatrix}$ — вектор коэффициентов усиления при управляющих воздействиях; $u(t)$ — входное напряжение; $W(t) = \begin{bmatrix} -\tilde{M}(t)/J \\ 0 \end{bmatrix}$ — вектор внешнего воздействия; $D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица дефектов, указывающая место возникновения дефектов; $d(t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix}$ — вектор, описывающий дефекты в электродвигателе (при отсутствии дефектов элементы вектора $d(t)$ равны нулю, а при их появлении конкретный элемент становится ненулевым); $d_1(t) = -\tilde{M}(t)/J$, $d_2(t) = -\tilde{R}(t)I(t)/L$; $y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix}$ — измеряемые датчиками переменные состояния движителя; $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица выхода, связывающая вектор состояния с вектором измерений; $D_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ — вектор, определяющий неисправный датчик; $\omega(t)$ — скорость вращения ротора движителя; k_b — коэффициент вязкого

трения; J — момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; $I(t)$, L — соответственно, ток и индуктивность цепи якоря электродвигателя; k_ω , k_M — соответственно, коэффициенты противоЭДС и крутящего момента; k_y — коэффициент усиления усилителя мощности; $M(t)$ — момент от взаимодействия гребного винта с вязкой средой, описываемый следующим выражением [5, 12]:

$$M(t) = F_m |\omega(t)| (s_\tau(t) + H_{гд} C_r \omega(t)), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} s_\tau(t) &= (K_s + H_{гд})\omega(t) - \frac{v_p(t)}{2} - \\ &- \text{sign}(\omega(t)) \sqrt{\left(K_s \omega(t) - \frac{v_p(t)}{2}\right)^2 + 2H_{гд} K_s \omega(t)^2}; \\ H_{гд} &= H + \delta_H \text{sign}(\omega(t)); \\ v_p(t) &= \begin{cases} v(t), & \text{если } \text{sign}(\omega(t)) = \text{sign}(v(t)); \\ 0, & \text{если } \text{sign}(\omega(t)) \neq \text{sign}(v(t)); \end{cases} \\ K_s &= F_\tau / (4\rho S_d); \end{aligned}$$

$v(t)$ — скорость перемещения окружающей жидкости относительно ПР вдоль оси винта; $H_{гд}$ — гидродинамический шаг винта; H — геометрический шаг винта; δ_H — гидродинамическая поправка на шаг винта; F_m — обобщенный коэффициент момента; F_τ — обобщенный коэффициент тяги; C_r — коэффициент профильных потерь винта; ρ — плотность окружающей жидкости; S_d — площадь диска винта; s_τ — абсолютное скольжение винта; v_p — вспомогательная переменная.

Предлагаемый в статье метод синтеза систем аккомодации включает три основных этапа.

1. Обнаружение и локализация возникающих дефектов с помощью банка ДН, в котором каждый наблюдатель синтезируется по специальной процедуре таким образом, чтобы формируемая им невязка реагировала (была чувствительна) на появление в системе (1) различных комбинаций ненулевых функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$. Анализ с учетом всех невязок, формируемых банком ДН, позволяет точно определить каждый конкретный дефект.

2. Оценка значения ошибки $\tilde{\omega}(t)$ в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости, значения $\tilde{R}(t)$ отклонения активного сопротивления якорной цепи двигателя от своего номинального значения, а также значения внешнего моментного воздействия $\tilde{M}(t)$. На этом этапе

вводятся дополнительные наблюдатели с переменной структурой (НПС) [13–15], построенные на основе редуцированных (имеющих меньшую размерность) моделей исходной системы (1). Это по сравнению с известными методами синтеза НПС [16–18] позволяет значительно уменьшить сложность процедуры идентификации дефектов и, тем самым, обеспечить их реализацию на бортовых ЭВМ роботов.

3. Формирование дополнительных управляющих воздействий, подаваемых на движители ПР, которые обеспечивают стабилизацию их динамических свойств и качественных показателей при возникновении перечисленных дефектов. Для этого предложено использовать методы построения самонастраивающихся корректирующих устройств [5], в которые вводятся полученные на предыдущем этапе оценки $\tilde{\omega}(t)$, $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{M}(t)$.

3. Построение банка ДН для обнаружения и локализации дефектов

Поскольку число измеряемых датчиками переменных состояния движителя меньше, чем число возможных дефектов, то построить ДН, определяющие появление конкретного дефекта, не представляется возможным. Поэтому предлагается сформировать специальный банк наблюдателей, каждый из которых синтезируется так, чтобы формируемые ими невязки позволяли выявлять в системе (1) различные комбинации возникающих дефектов.

Ниже рассмотрен синтез указанных ДН, которые в общем виде описываются матричным дифференциальным уравнением [19]

$$\begin{aligned} \dot{x}_*(t) &= A_* x_*(t) + B_* u(t) + W_*(t) + \\ &+ J_* y(t) + K_* r(t), \\ y_*(t) &= C_* x_*(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_*(t) \in R^k$ — вектор состояния ДН; $y_*(t)$ — выходной сигнал; $A_* \in R^{k \times k}$ — матрица динамических свойств ДН; $B_* \in R^{k \times 1}$ — вектор при управлении $u(t)$; $W_*(t) \in R^k$ — вектор внешних возмущений; $J_* \in R^{k \times 2}$, $K_* \in R^{k \times 1}$ — соответственно матрица и вектор коэффициентов усиления; $r(t) = R_* y(t) - y_*(t)$ — невязка, формируемая ДН ($r(t) = 0$ при отсутствии дефекта, определяемого наблюдателем, $r(t) \neq 0$ при его появлении); $R_* \in R^{1 \times 2}$, $C_* \in R^{1 \times k}$ — векторы-строки; k — число переменных состояния ДН (порядок ДН).

Полагается [19], что при отсутствии дефектов выполняются равенства $x_*(t) = \Phi x(t)$ и

$y_*(t) = R_* y(t)$ для матриц $\Phi \in R^{k \times 2}$ и вектора R_* , удовлетворяющих условиям

$$\Phi A = A_* \Phi + J_* C, \quad R_* C_* = C \Phi. \quad (4)$$

Для того чтобы невязка $r(t)$, формируемая ДН (3), становилась ненулевой при появлении в системе (1) ненулевых функций $d_1(t)$ или $d_2(t)$, необходимо выполнение условия $\Phi D_j \neq 0$ (где $j = \overline{1, 2}$ — номер столбца матрицы D), а для выявления ошибок в показаниях датчика скорости — условия $J_* D_s \neq 0$.

При записи матрицы A_* и вектора C_* в каноническом виде

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

из уравнения (4) можно получить следующие выражения для строк матриц Φ и J_* [19]:

$$\Phi_1 = R_* C; \quad \Phi_i A = \Phi_{i+1} + J_{*i} A, \quad i = \overline{1, k-1}; \quad (5)$$

$$\Phi_k A = J_{*k} A,$$

где Φ_i и J_{*i} — i -е строки матриц Φ и J_* , $i = 1, \dots, k$.

В работе [19] показано, что выражения (5) можно свести к одному уравнению

$$R_* C A^k = J_{*1} C A^{k-1} + J_{*2} C A^{k-2} + \dots + J_{*k} C, \quad (6)$$

которое представляет собою систему линейных алгебраических уравнений, содержащую $2k + 2$ неизвестных. Поскольку для системы (1) возможно построение наблюдателей с размерностью не выше 2, то с учетом вида матриц A и C выражение (6) для синтезируемых ДН примет следующий вид:

• при $k = 1$

$$\begin{cases} R_{*1} a_{11} + R_{*2} a_{21} = J_{*11}, \\ R_{*1} a_{12} + R_{*2} a_{22} = J_{*12}; \end{cases} \quad (7)$$

• при $k = 2$

$$\begin{cases} R_{*1} a_{11}^2 + R_{*2} a_{21} a_{12} + R_{*1} a_{12} a_{21} + R_{*2} a_{21} a_{22} = \\ = J_{*11} a_{11} + J_{*12} a_{21} + J_{*21}, \\ R_{*2} a_{22}^2 + R_{*1} a_{12} a_{22} + R_{*1} a_{11} a_{12} + R_{*2} a_{12} a_{21} + \\ + R_{*1} a_{22} = J_{*11} a_{12} + J_{*12} a_{22} + J_{*22}, \end{cases} \quad (8)$$

где R_{*j} , J_{*ij} — элементы векторов R_* и J_* , соответственно, $j = \overline{1, 2}$, $i = \overline{1, k}$.

При синтезе ДН для нахождения матриц J_* , R_* , Φ , B_* и W_* использован следующий алгоритм.

1. Принять $k = 1$.
2. Ввести переменные R_{*1} и R_{*2} и задать матрицу $\Phi = [R_{*1} \ R_{*2}]$.
3. Решить систему уравнений (7), подобрав переменные R_{*1} и R_{*2} таким образом, чтобы

выполнить условие чувствительности либо нечувствительности ДН к определенной группе дефектов. Если решения уравнения (7) не существует, принять $k = 2$ и перейти к п. 4, в противном случае — перейти к п. 7

4. Используя уравнения (8), выразить J_{*21} и J_{*22} через R_{*1} , R_{*2} , J_{*11} и J_{*12} , которые принять свободными переменными.

5. Определить строки матрицы Φ , используя соотношения: $\Phi_1 = [R_{*1} \ R_{*2}]$, $\Phi_2 = \Phi_1 A - [J_{*11} \ J_{*12}]$.

6. Решить систему уравнений (8), подобрав свободные переменные R_{*1} , R_{*2} , J_{*11} и J_{*12} таким образом, чтобы выполнить условия чувствительности либо нечувствительности ДН к определенной группе дефектов.

7. Определить матрицы B_* и $W_*(t)$, используя равенства: $B_* = \Phi B$, $W_*(t) = \Phi W(t)$.

8. Выбрать матрицу K_* так, чтобы матрица $A_{**} = A_* - K_* C_*$ имела собственные числа с отрицательными вещественными частями. Поскольку матрицы A_* и C_* имеют канонический вид, то матрица K_* всегда существует.

Используя указанный алгоритм и уравнения (1), формируются все ДН:

1) ДН⁽¹⁾ первого порядка, фиксирующий появление в системе (1) ненулевых функций $d_2(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$, но инвариантный к $d_1(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*^{(1)}(t) &= -\frac{k_\omega}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + k^{(1)} r^{(1)}(t), \\ y_*^{(1)}(t) &= x_*^{(1)}(t), \quad r^{(1)}(t) = y_2(t) - y_*^{(1)}(t); \end{aligned} \quad (9)$$

2) ДН⁽²⁾ первого порядка, фиксирующий появление в системе (1) ненулевых функций $d_1(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$, но инвариантный к $d_2(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*^{(2)}(t) &= -\frac{k_B}{J} y_1(t) + \frac{k_M}{J} y_2(t) - \frac{M(t)}{J} + k^{(2)} r^{(2)}(t), \\ y_*^{(2)}(t) &= x_*^{(2)}(t), \quad r^{(2)}(t) = y_1(t) - y_*^{(2)}(t); \end{aligned} \quad (10)$$

3) ДН⁽³⁾ второго порядка, фиксирующий появление в системе (1) ненулевых функций $d_1(t)$ и $d_2(t)$, но инвариантный к $\tilde{\omega}(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_*^{(3)}(t) &= x_*^{(3)}(t) + \left(-\frac{k_B}{J} - \frac{R}{L} \right) y_2(t) + \\ &+ \frac{k_y}{L} u(t) + k_1^{(3)} r^{(3)}(t), \\ \dot{x}_*^{(3)}(t) &= \left(-\frac{k_M k_\omega}{JL} - \frac{k_B R}{JL} \right) y_2(t) + \\ &+ \frac{k_B k_y}{JL} u(t) + \frac{M(t) k_\omega}{JL} + k_2^{(3)} r^{(3)}(t), \\ y_*^{(3)}(t) &= x_*^{(3)}(t), \quad r^{(3)}(t) = y_2(t) - y_*^{(3)}(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где $x_*^{(q)}(t)$, $y_*^{(q)}(t)$ и $r^{(q)}(t)$ — элементы вектора состояния, выход и невязка q -го ДН ($q = \overline{1, 3}$), соответственно.

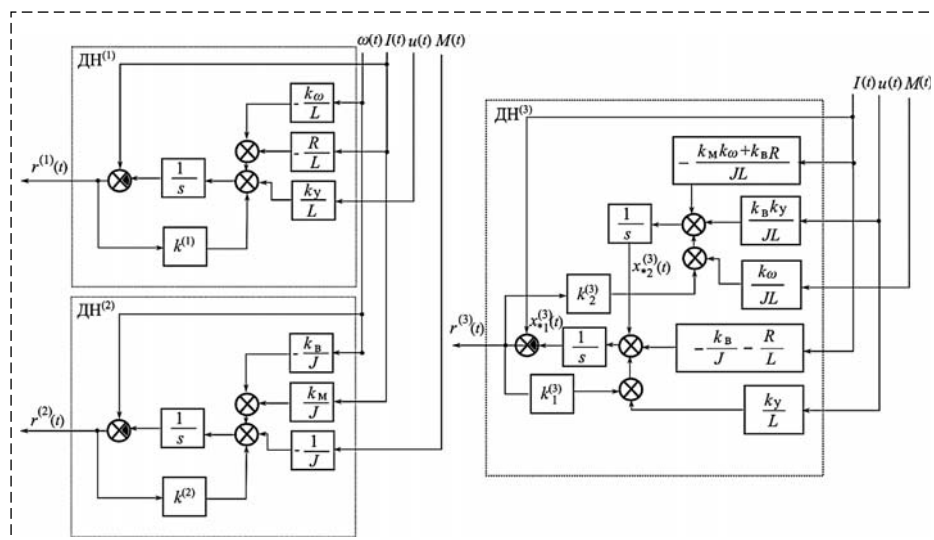


Рис. 1. Структурная схема банка ДН

Fig. 1. Functional block diagram of the bank of diagnostic observers

Банк ДН (9)–(11), структурная схема которого приведена на рис. 1, определяет факт и время появления ненулевых функций $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$ в системе (1). Решение о типе конкретного дефекта принимается с помощью невязок $r^{(1)}(t)$, $r^{(2)}(t)$ и $r^{(3)}(t)$ по правилам:

1) если $r^{(1)}(t) = 0$, $r^{(2)}(t) = 0$ и $r^{(3)}(t) = 0$, то дефектов в двигателе нет;

2) если $r^{(1)}(t) = 0$, $r^{(2)}(t) \neq 0$ и $r^{(3)}(t) \neq 0$, то в системе (1) появилась ненулевая функция $d_1(t)$ (появился внешний момент на валу двигателя);

3) если $r^{(1)}(t) \neq 0$, $r^{(2)}(t) = 0$ и $r^{(3)}(t) \neq 0$, то в системе (1) появилась ненулевая функция $d_2(t)$ (произошло отклонение активного сопротивления якорной цепи двигателя от своего номинального значения);

4) если $r^{(1)}(t) \neq 0$, $r^{(2)}(t) \neq 0$ и $r^{(3)}(t) = 0$, то в системе (1) $\tilde{\omega}(t) \neq 0$ (появилась ошибка в сигнале, получаемом от датчика угловой скорости);

5) если $r^{(1)}(t) \neq 0$, $r^{(2)}(t) \neq 0$ и $r^{(3)}(t) \neq 0$, то одновременно возникло нескольких дефектов, которые не удастся определить с помощью построенного банка ДН и необходимо прекратить выполняемую ПР миссию.

4. Построение НПС

В настоящее время одним из перспективных подходов к идентификации дефектов является использование НПС. Описанные в работах [16–18] методы построения таких наблюдателей предполагают наложение на систему (1) ряда существенных ограничений и построения ДН полного порядка, что усложняет процедуру точной идентификации дефектов в двигателях

ПР. Поэтому для решения задачи точной оценки значений $\tilde{\omega}(t)$, $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{M}(t)$ использованы НПС, построенные на основе редуцированных моделей системы (1). Подробное описание процедуры синтеза таких наблюдателей приведено в работах [13–15].

Из выражений (9)–(11) видно, что неизвестные функции $d_1(t)$ и $d_2(t)$ могут быть вычислены с использованием только ДН(1) или ДН(2). Поэтому построение редуцированных моделей исходной системы целесообразно осуществлять, беря за основу именно эти наблюдатели. Тогда в общем виде

полученные модели первого порядка будут описываться уравнениями [13]

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

а НПС — системой уравнений [13]

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + \Phi D\gamma(t) + K_*\hat{e}_y(t); \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_*(t),\end{aligned}\quad (12)$$

где $\hat{x}_*(t)$, $\hat{y}_*(t)$ — состояние и выход НПС, соответственно; $\hat{e}_y(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t)$ — ошибка по выходу;

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

g — скаляр.

При выборе наблюдатель (12) асимптотически устойчив [13], т. е. ошибка оценивания $\hat{e}(t) = x_*(t) - \hat{x}_*(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Оценка значения функции $d(t)$ может быть проведена при использовании фильтра низких частот (ФНЧ) [20]: $\hat{d}(t) = \gamma_\gamma(t)$, где $\hat{d}(t)$ — полученная наблюдателем (12) оценка функции $d(t)$; $\gamma_\gamma(t)$ — значение функции $\gamma(t)$ на выходе ФНЧ.

С учетом выражений (9), (10) и (12) для двигателей ПР были получены следующие НПС:

1) НПС(1) для оценки значения $\tilde{M}(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*^{(1)}(t) &= -\frac{k_\beta}{J}y_1(t) + \frac{k_M}{J}y_2(t) - \\ &\quad - \frac{\tilde{M}(t)}{J} + \hat{k}^{(1)}\hat{e}_y^{(1)}(t) + \gamma^{(1)}(t),\end{aligned}\quad (13)$$

$$\begin{aligned}\hat{y}_*^{(1)}(t) &= \hat{x}_*^{(1)}(t), \quad \hat{e}_y^{(1)}(t) = y_1(t) - \hat{y}_*^{(1)}(t), \\ \tilde{M}(t) &= -\gamma_\gamma^{(1)}(t)J;\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*^{(2)}(t) &= -\frac{k_\omega}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + \hat{k}^{(2)} \hat{e}_y^{(2)}(t) + \gamma^{(2)}(t), \\ \hat{y}_*^{(2)}(t) &= \hat{x}_*^{(2)}(t), \quad \hat{e}_y^{(2)}(t) = y_2(t) - \hat{y}_*^{(2)}(t), \\ \tilde{R}(t) &= -\gamma_3^{(2)}(t)L/I(t).\end{aligned}\quad (14)$$

Аналогично можно оценить значение ошибки $\tilde{\omega}(t)$ в показаниях датчика угловой скорости вращения движителя ПР с учетом редуцированной модели, построенной на основе ДН⁽¹⁾, используя уравнения [15]

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= B_*u(t) + J_*y(t) + W_*(t) + J_*D_*d_s(t); \\ y_*(t) &= x_*(t).\end{aligned}$$

Построенный на основе этой модели НПС⁽³⁾ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_*^{(3)}(t) &= -\frac{k_\omega}{L} y_1(t) - \frac{R}{L} y_2(t) + \frac{k_y}{L} u(t) + \\ &+ \hat{k}^{(3)} \hat{e}_y(t) + \frac{k_\omega}{L} \gamma^{(3)}(t); \\ \hat{y}_*^{(3)}(t) &= \hat{x}_*^{(3)}(t); \quad \hat{e}_y^{(3)}(t) = y_2(t) - \hat{y}_*^{(3)}(t); \\ \tilde{\omega}(t) &= \gamma_3^{(3)}(t).\end{aligned}\quad (15)$$

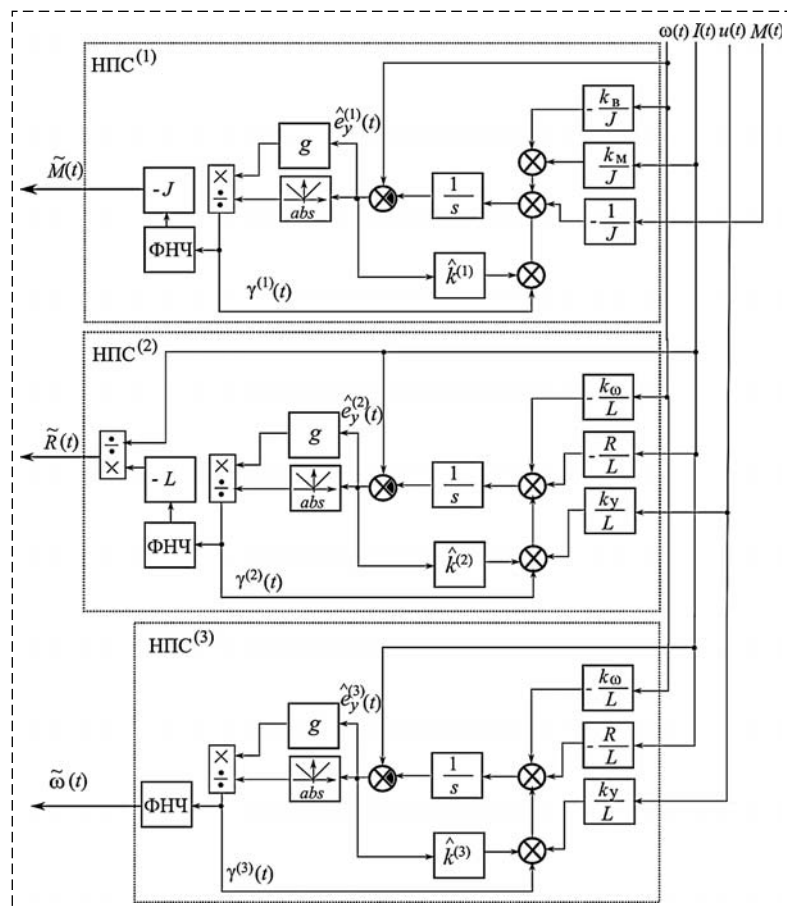


Рис 2. Структурная схема дополнительных НПС

Fig. 2. Functional block diagram of the additional sliding mode observers

Структурная схема полученных НПС (13)–(15) приведена на рис. 2.

Полученные НПС (13)–(15) позволяют решить задачу идентификации дефектов в движителях ПР. Если эти дефекты не являются глобальными, то последствия их появления, снижающие качество работы движителей, могут быть устранены с помощью специальных систем аккомодации, рассмотренных ниже.

5. Формирование дополнительных управляющих воздействий в системе аккомодации

При создании систем аккомодации к дефектам целесообразно использовать метод синтеза самонастраивающихся корректирующих устройств [5], который с помощью специального закона изменения управляющего сигнала $u(t)$ позволяет придать движителям желаемые динамические свойства, стабилизируя их параметры, в том числе и при возникновении дефектов, приводящих к появлению ненулевых функций $\tilde{M}(t)$, $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$.

Так как влияние индуктивности обмоток на динамику движителей незначительно при малых изменениях скоростей их вращения, то индуктивностью можно пренебречь, существенно упрощая синтез закона управления, а систему уравнений (1) можно записать в упрощенном виде [5]:

$$\begin{aligned}J\dot{\omega}(t) + \frac{k_M k_\omega}{R + \tilde{R}(t)} \omega(t) + M(t) + \tilde{M}(t) &= \\ &= \frac{k_M k_y}{R + \tilde{R}(t)} u(t).\end{aligned}\quad (16)$$

Тягу реального движителя ПР можно описать уравнением [5]

$$T(t) = F_\tau |\omega(t)| s_\tau(t), \quad (17)$$

а его желаемую динамику — дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$T_d \dot{T}(t) + T(t) = T_*(t) \quad (18)$$

где $T_*(t)$ — желаемая тяга двигателя; T_d — постоянный коэффициент.

Продифференцировав выражение (17) по времени и (в силу большой инерционности ПР) пренебрегая производными от $v(t)$, можно получить:

$$\dot{T}(t) = F_{\tau} \frac{k_M k_y u(t) - k_M k_{\omega} \omega(t) - (R + \tilde{R}(t))(M(t) + \tilde{M}(t))}{(R + \tilde{R}(t))J} N(t), \quad (19)$$

где $N(t) = s_{\tau}(t)\text{sign}(\omega(t)) + |\omega(t)| \left(K_s + H_{\text{гд}} - \frac{K_s ((K_s + 2H_{\text{гд}})\omega(t) - v(t)/2)\text{sign}\omega(t)}{\sqrt{(K_s \omega(t) - v(t)/2)^2 + 2H_{\text{гд}} K_s \omega(t)^2}} \right)$.

Для стабилизации динамических свойств движителей при появлении дефектов, приводящих к появлению ошибок датчиков скоростей их вращения, к изменению значений активных сопротивлений электродвигателей и к появлению дополнительных внешних моментных воздействий на их валах, необходимо ввести такой закон изменения управляющего сигнала $u(t)$, при котором будет обеспечено равенство величин $\dot{T}(t)$, полученных из уравнений (18) и (19). Решив систему уравнений (18), (19) относительно $u(t)$, а также учитывая соотношение для тяги (17) и момента (2), можно получить искомый закон управления, обеспечивающий аккомодацию к дефектам:

$$u(t) = \left(J \frac{T_{\text{ж}}(t) - F_{\tau} |\omega(t)| s_{\tau}(t)}{T_d F_{\tau} N(t)} + \frac{k_M k_{\omega}}{R + \tilde{R}(t)} + F_m |\omega(t)| (s_{\tau}(t) + H_{\text{гд}} C_r \omega(t)) + \tilde{M}(t) \right) \frac{R + \tilde{R}(t)}{k_M k_y}, \quad (20)$$

который позволяет компенсировать последствия появления любого из трех указанных дефектов, приводящих к появлению ненулевых функций $M(t)$, $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{\omega}(t)$. При этом, если выявляется

ошибка в показаниях датчика угловой скорости, то формируется оценка реальной скорости вращения вала движителя $\omega_{\text{оц}}(t) = \omega(t) - \tilde{\omega}(t)$, которая используется при формировании сигнала (20) вместо сигнала $\omega(t)$, получаемого от дефектного датчика скорости.

Обобщенная структурная схема синтезированной системы аккомодации к дефектам в движителе ПР показана на рис. 3. При ее работе банк из трех ДН (9)–(11) формирует невязки $r^{(1)}(t)$, $r^{(2)}(t)$ и $r^{(3)}(t)$, которые в блоке локализации дефектов позволяют обнаружить тип дефекта. Если какой-либо дефект выявлен, то в соответствующем ему НПС (13)–(15) определяются величины $\tilde{M}(t)$, $\tilde{R}(t)$ или $\tilde{\omega}(t)$, с учетом которых формируется управляющий сигнал (20), обеспечивающий создание движителем желаемой тяги $T_{\text{ж}}(t)$ с одновременной компенсацией последствий появляющихся дефектов.

6. Исследование качества работы движителей ПР с синтезированной системой аккомодации

Для проверки эффективности предложенной системы аккомодации было проведено математическое моделирование, в процессе которого исследовалось влияние возникающих дефектов на ошибку отслеживания ПР заданной программной траектории и качество компенсации последствий этих дефектов предложенной системой аккомодации.

При моделировании рассматривался автономный ПР массой 170 кг, оснащенный ранее спроектированной высококачественной системой управления, которая из-за ограничений объема статьи в данной работе не приведена, но детально описана в работе [21]. Указанная система управления ПР, формирующая желаемую тягу $T_{\text{ж}}(t)$ для каждого из движителей ПР, содержит нелинейный регулятор, обеспечивающий его желаемые динамические характеристики при номинальных значениях параметров, и адаптивный регулятор с самонастройкой по эталонной модели, гарантирующей качественную работу

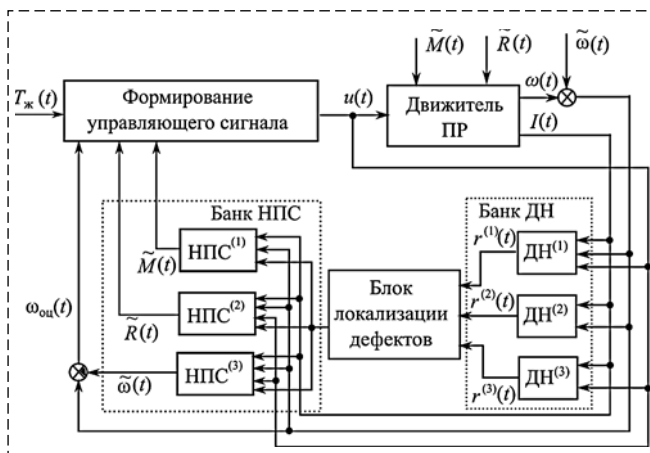


Рис. 3. Структурная схема системы аккомодации к дефектам в движителе ПР

Fig. 3. Functional block diagram of the fault accommodation system for thruster of underwater robot

этих движителей даже при переменных и точно неизвестных параметрах ПР. Эта система управления без учета возможных дефектов движителей обеспечивает его точное движение по сложным пространственным траекториям независимо от изменения массы и моментов инерции ПР, от гидростатических и гидродинамических сил и моментов, а также от присоединенных масс и моментов инерции жидкости.

Для управления ПР использовались одинаковые движители со следующими параметрами: $k_b = 67,5610 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$; $J = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $R = 0,65 \text{ Ом}$; $L = 0,00026 \text{ Гн}$; $k_\omega = 0,135 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}$; $k_y = 27,71$; $k_m = 0,135 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{А}$; $F_\tau = 4 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}$; $T_d = 0,1$; $H_{гд} = 0,12 \text{ м}$; $\delta_H = 0,002 \text{ м}$; $C_r = 0,12$; $S_d = 0,01 \text{ м}^2$; $F_m = 0,075 \text{ Н} \cdot \text{с}^2$. В процессе моделирования дефекты появлялись только в одном движителе, обеспечивающем продольное движение ПР.

Цифрой 1 на рис. 4 показаны изменения ошибок отслеживания ПР заданной программной траектории, описываемой уравнениями $x(t) = 1.1t \text{ м}$, $y(t) = 10\cos(0,02t) - 10 \text{ м}$, $z(t) = 5 \text{ м}$, при отсутствии и возникновении различных дефектов с использованием системы аккомодации. При этом максимальное отклонение ПР от указанной траектории не превышает 0,22 м, однако возникновение дефектов в движителях без введения системы аккомодации, как будет показано ниже, может приводить к существенному снижению точности движения.

Цифрой 2 на рис. 4 обозначена ошибка слежения ПР без использования системы аккомодации, при появлении в момент времени $t = 100 \text{ с}$ дополнительного момента на валу двигателя $M(t) = 1,5M(t)$. Указанный дефект привел к непрерывному увеличению ошибки слежения

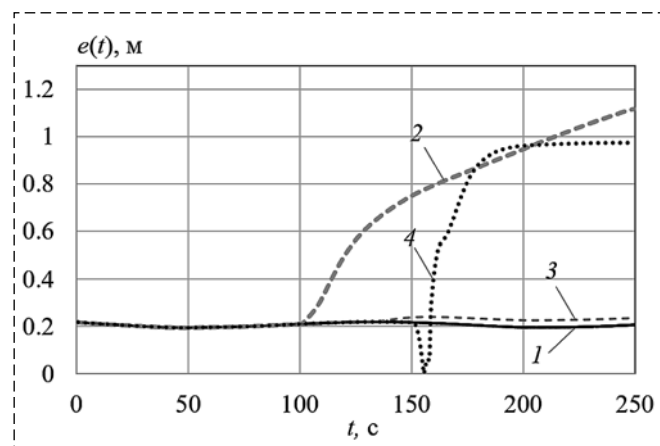


Рис. 4. Изменения ошибок слежения ПР при возникновении дефектов

Fig. 4. Process of changing underwater robot dynamic error in case of faults

с 0,22 м до 1,1 м всего за 150 с (ошибка слежения увеличилась в 5 раз).

Цифрой 3 обозначена ошибка слежения ПР без использования системы аккомодации при увеличении активного сопротивления якоря двигателя на 20 % ($\dot{R}(t) = 0,13 \text{ Ом}$) в момент времени $t = 130 \text{ с}$. В этом случае ошибка движения ПР по траектории увеличивается не сильно (на 15 %). Поэтому полученная информация в основном служит индикатором для изменения режима (скорости) движения ПР, а возможно, и полного прекращения ПР его миссии для исключения перегрева двигателя и возможного выхода его из строя из-за пробоя обмотки.

Цифрой 4 на рис. 4 обозначен график ошибки слежения ПР при возникновении в момент времени $t = 150 \text{ с}$ ошибки в показаниях датчика угловой скорости $\tilde{\omega}(t) = 10 \text{ рад} / \text{с}$, которая составляет около 30 % от средней скорости вращения движителя. При отсутствии системы аккомодации это привело к увеличению ошибки слежения в 4,3 раза.

Таким образом, результаты моделирования показали, что при возникновении любого из рассмотренных дефектов применение предложенной системы аккомодации позволило практически полностью сохранить исходную точность движения ПР по предписанной траектории, т. к. ошибка движения по этой траектории при появлении указанных дефектов увеличивалась не более чем на 1 %.

Закключение

В статье предложен новый метод синтеза систем аккомодации, обеспечивающих своевременное обнаружение, определение значения и компенсацию последствий появления незначительных дефектов, возникающих в движителях ПР. Результаты моделирования подтвердили работоспособность и высокое качество работы синтезированных систем. Предложенные системы аккомодации достаточно просты и имеют малую вычислительную сложность реализации. Это позволяет обеспечить их реализацию на типовых бортовых вычислителях ПР.

Список литературы

1. Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Костенко В. В., Матвиенко Ю. В., Павин А. М., Щербатюк А. Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Изд-во ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
2. Инзарцев А. В., Грибова В. В., Клещев А. С. Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 4–11.

3. **Chirikjian G. S.** Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations // *Distributed Autonomous Robotic Systems*. 2009. N. 8. P. 273–281.
4. **Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Жирабок А. Н., Протценко А. А., Subudhi B.** Метод синтеза систем непрерывной аккомодации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках автономных подводных роботов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Т. 16, № 4. С. 282–288.
5. **Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.** Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 270 с.
6. **Zhu D., Sun B.** Information fusion fault diagnosis method for unmanned underwater vehicle thrusters // *IET Electrical Systems in Transportation*. 2013. Vol. 3, N. 4. P. 102–111.
7. **Wang J.** Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN // *Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2012. P. 2931–2934.
8. **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, N. 6. P. 2399–2407.
9. **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.
10. **Xiao Liang, Wei Li, Linfang Su, Han Yin, Jun Zhao.** Thruster Fault Diagnosis of Autonomous Underwater Vehicles Based on Least Disturbance Wavelet Neural Network // *Proc. of the Second International Conference on Computer Modeling and Simulation*. Sanya, Hainan, China. 2010. P. 78–82.
11. **Nilanjan Sarkar.** Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2002. P. 223–233.
12. **Агеев М. Д.** Упрощенная методика расчета движителей для АПА // *Подводные роботы и их системы*. Владивосток: Дальнаука, 1995. С. 33–49.
13. **Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е.** Методы диагностирования линейных систем на основе скользящих наблюдателей // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2019. № 6. С. 73–89.
14. **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.
15. **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.
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. **Шумский А. Е., Жирабок А. Н.** Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. 196 с.
20. **Уткин В. И.** Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974. 272 с.
21. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.** Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток: Дальнаука. 2016. 400 с.

Development of Accommodation System for Faults in Thrusters of Underwater Robots

V. F. Filaretov^{1, 2}, filaret@iacp.dvo.ru, **A. V. Zuev**³, zuev@iacp.dvo.ru,

A. N. Zhirabok^{2, 3}, zhirabok@mail.ru, **A. A. Protsenko**³, protsenkoalan@yandex.ru,

¹ Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, 690041, Russian Federation,

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,

³ Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, 690091, Russian Federation

*Corresponding author: Protsenko A. A., Junior Researcher, Institute of Marine Technology Problems,
Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690091, Russian Federation,
e-mail: protsenkoalan@yandex.ru*

Accepted on January 26, 2021

Abstract

The article discusses a solution to the problem of increasing the reliability of operation of underwater robots through the use of accommodation systems that compensate for the consequences of faults that appear in the thrusters. The following types of faults were considered: 1) a fault in the rotation speed sensor of thruster, causing error in its readings; 2) overheating of the motor or short-circuiting of several turns of the winding of its armature circuit, causing a change in the value of electrical resistance; 3) the appearance of an unknown external torque effect on the engine shaft, including when winding plants on the propeller. A new method for constructing accommodation systems is proposed, which contains three stages. At the first, the detection of emerging faults is carried out using the bank of diagnostic observers. Each observer is synthesized according to a special procedure in such a way that the residual formed by it is sensitive to the appearance of various combinations of possible faults. This allows to detect each specific fault. At the second stage, the values of sensor errors and deviations of the parameters of the thruster from their nominal values are estimated by additional variable struc-

ture observers. At the third stage, additional control signals for robot's thrusters are formed. They ensure the stabilization of dynamic properties and quality indicators of thrusters in the event of faults. The results of mathematical modeling are presented, which have confirmed the operability and high efficiency of the synthesized accommodation system.

Keywords: underwater robot, thruster, sensor, fault, observer, diagnosis, identification, accommodation

Acknowledgements: This work was supported by RFBR grants 20-38-70161 and 19-08-00347, as well as by the Scholarship of President of Russian Federation (SP-3252.2019.5).

For citation:

Filaretov V. F., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Protsenko A. A. Development of Accommodation System for Faults in Thrusters of Underwater Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 5, pp. 262–271.

DOI: 10.17587/mau.22.262-271

References

1. Inzartsev A. V., Kiselev L. V., Kostenko V. V., Matvienko Yu. V., Pavin A. M., Shcherbatyuk A. F. Underwater robotic systems: systems, technologies, applications, Vladivostok, Publishing house of IPMT DVO RAN, 2018, 368 p. (in Russian).
2. Inzartsev A. V., Gribova V. V., Kleshchyov A. S. Intelligent system for the formation of behavior of an autonomous underwater robot in emergency situations, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2015, no. 2 (20), pp. 4–11 (in Russian).
3. Chirikjian G. S. Robotic Self-replication, Self-diagnosis, and Self-repair: Probabilistic Considerations, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2009, no. 8, pp. 273–281.
4. Filaretov V. F., Zuev A. V., Zhirabok A. N., Protsenko A. A., Subudhi B. Method of synthesis of continuous systems of accommodation to the faults in navigation sensors of autonomous underwater robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 4, pp. 282–288 (in Russian).
5. Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yuhimets D. A. Devices and control systems of underwater robots, Moscow, Nauka, 2005, 270 p. (in Russian).
6. 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.
7. Wang J. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle with FNN, *Proc. of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2012, pp. 2931–2934.
8. 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.
9. 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.
10. Xiao Liang, Wei Li, Linfang Su, Han Yin, Jun Zhao. Thruster Fault Diagnosis of Autonomous Underwater Vehicles Based on Least Disturbance Wavelet Neural Network, *Proc. of the Second International Conference on Computer Modeling and Simulation*, Sanya, Hainan, China, 2010, pp. 78–82.
11. Nilanjan Sarkar. Fault-Accommodating Thruster Force Allocation of an AUV Considering Thruster Redundancy and Saturation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, pp. 223–233.
12. Ageev M. D. Simplified methodology for calculating UR propulsion devices, *Podvodnye roboty i ih sistemy*, Vladivostok, Dal'nauka, 1995, pp. 33–49 (in Russian).
13. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumskij A. E. Methods for diagnosing linear systems based on sliding observers, *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2019, no. 6, pp. 73–89 (in Russian).
14. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumskij A. E. Diagnosing Linear Dynamical Systems: A Sliding Observer Approach, *Avtomatika i telemekhanika*, 2020, no. 2, pp. 18–35 (in Russian).
15. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumskij A. E. Identification of faults in sensors of technical systems using sliding observers, *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2019, no. 10, pp. 21–28 (in Russian).
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, pp. 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. Shumskij A. E., Zhirabok A. N. Methods and algorithms for diagnosing and fault-tolerant control of dynamic systems, Vladivostok, DVG TU, 2009, 196 p. (in Russian).
20. Utkin V. I. Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, Moscow, Nauka, 1974, 272 p. (in Russian).
21. Filaretov V. F., Yuhimets D. A. Features of the synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space, Vladivostok, Dal'nauka, 2016, 400 p. (in Russian).