

А. Н. Жирабок, д-р техн. наук, проф.,
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,
А. С. Якшин, инженер,
ООО Эрланг Северо-Запад, г. Санкт-Петербург

Решение задачи диагностирования датчиков системы управления необитаемым подводным аппаратом*

Рассматривается задача диагностирования дефектов датчиков системы управления необитаемого подводного аппарата. Особенность задачи состоит в задании рассматриваемой системы управления структурной схемой, содержащей передаточные функции и статические нелинейности.

Ключевые слова: нелинейные системы, структурные схемы, передаточные функции, статические нелинейности, диагностирование, наблюдатели состояния, необитаемые подводные аппараты, датчики системы управления

1. Введение и постановка задачи

Использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является перспективным для решения многих научных и прикладных задач: сбора океанологических данных, поиска и обследования донных подводных объектов, выполнения подводно-технических работ на больших глубинах, не требующих присутствия человека, и др. [2].

Особенность класса решаемых задач требует от АНПА наличия на борту системы управления (СУ), отвечающей за его нормальное функционирование, сбор и обработку информации, обеспечение собственной безопасности в экстремальных ситуациях. Одним из важнейших компонентов СУ АНПА являются навигационно-пилотажные датчики. Задача своевременного выявления дефектов этой группы датчиков является достаточно актуальной, поскольку нарушение их функционирования при формировании траектории движения может привести к неправильному выполнению поставленной задачи или даже потере АНПА.

Несмотря на то что СУ различных АНПА могут отличаться конструкцией, компоновкой и элементным составом, их обобщенная структура в достаточной степени определилась [3] и включает в себя:

- 1) центральную систему управления (ЦСУ):
 - программное устройство (ПУ);
 - контрольно-аварийную систему (КАС);
 - датчики КАС ($D_{КАС}$);
- 2) систему управления движением (СУД):
 - устройство обработки сигналов (УОС);
 - датчики ориентации аппарата ($D_{ОА}$);
- 3) навигационную систему (НС):
 - навигационный вычислитель (НВ);
 - датчик курса (D_K);
 - датчик скорости (D_C);
 - датчик глубины (D_G);
- 4) информационно-измерительную систему (ИИС):
 - накопитель данных;
 - датчики внешней среды ($D_{ИС}$).

* Работа поддержана грантами Дальневосточного федерального университета и Минобрнауки РФ (государственное задание № 1141).

- 4) информационно-измерительную систему (ИИС):
 - накопитель данных;
 - датчики внешней среды ($D_{ИС}$).

Фрагмент обобщенной структурной схемы, иллюстрирующий информационное взаимодействие подсистем СУ АНПА с датчиками, представлен на рис. 1. Более подробно вопросы построения СУ АНПА рассмотрены в работе [3].

С точки зрения использования методов диагностирования все приведенные на рис. 1 датчики могут быть разделены на две группы: навигационно-пилотажные ($D_{ОА}$, D_K , D_C , D_G) и датчики среды ($D_{КАС}$, $D_{ИС}$).

Датчики среды могут быть продиагностированы с помощью аппаратной избыточности, в простейшем случае дублированием, поскольку между параметрами среды практически не существует никаких зависимостей и каждый датчик работает как бы сам по себе [1, 5]. Напротив, между навигационно-пилотажными датчиками имеются определенные зависимости, которые обусловлены динамикой аппарата и могут быть использованы для диагности-

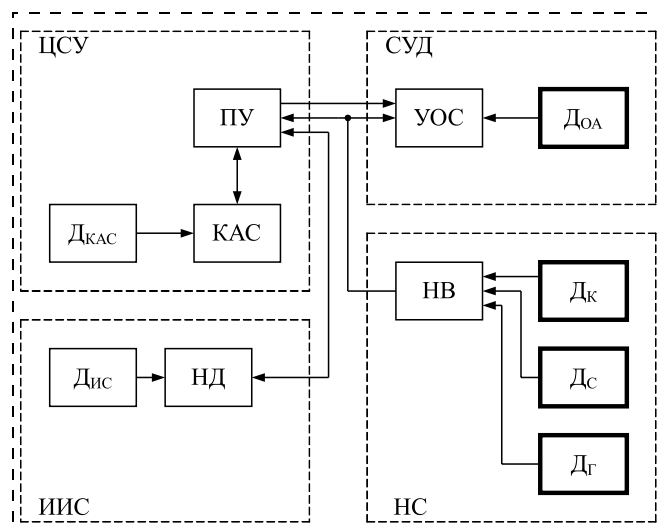


Рис. 1. Фрагмент обобщенной структурной схемы систем АНПА

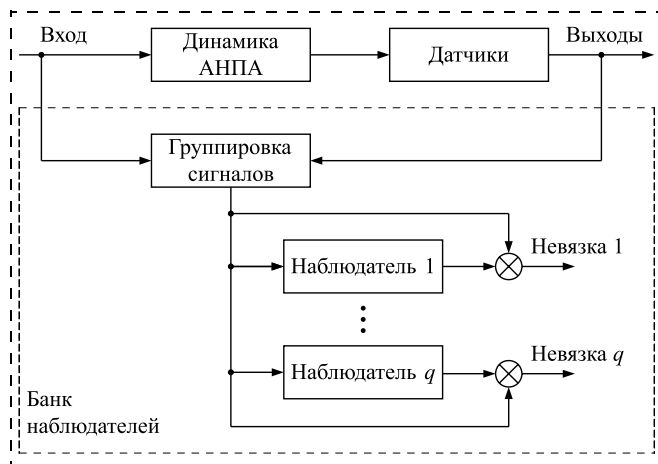


Рис. 2. Локализация дефектов с использованием банка наблюдателей

рования. Подходы, использующие подобного рода зависимости, традиционно объединяются общей концепцией аналитической избыточности. Аналитическая избыточность предполагает, что существуют два или более способов определения значений переменных системы, один из которых использует ее математическую модель, заданную в аналитическом виде. В этом смысле аналитическая избыточность является альтернативой аппаратной избыточности.

Одним из методов диагностирования систем на основе аналитической избыточности является использование так называемых наблюдателей состояния, которые строятся на основе математической модели диагностируемого объекта, при этом на каждый наблюдатель подаются управляющие сигналы и измеряемые компоненты вектора состояния [1, 5]. Принятие решения происходит на основе анализа сигналов рассогласования (невязок) между выходами датчиков и выходами соответствующих наблюдателей. Получаемые таким образом невязки

близки к нулю при отсутствии дефектов и существенно отличны от нуля в случае их появления.

Необходимо отметить, что в общем случае сигнал невязки позволяет только понять — есть дефект или нет, информации о месте возникновения, типе и величине дефекта он не несет. Поэтому для решения задачи локализации используется так называемый банк наблюдателей [1, 5], схема использования которого представлена на рис. 2. Каждый наблюдатель настроен на обнаружение ряда дефектов, в идеальном случае для каждого дефекта — свой наблюдатель.

Совместное использование банка наблюдателей существенно повышает качество локализации дефектов. Кроме того, применение банка наблюдателей позволяет успешно противодействовать влиянию помех. В работе [4] представлен подход, позволяющий обеспечить достаточно низкую чувствительность к дестабилизирующим факторам путем использования для генерации сигнала невязки совместной работы нескольких наблюдателей.

Рассмотрим задачу построения банка наблюдателей для диагностирования навигационно-пилотажных датчиков канала управления по глубине СУ АНПА "МТ-88" [2, 3]. Аналогичная задача решалась ранее в работе [6] для случая, когда АНПА задавался моделью в пространстве состояний. Особенность же настоящей работы состоит в задании рассматриваемого канала управления структурной схемой в виде совокупности отдельных блоков. Такое задание нередко используется при проектировании различных технических систем, чем обуславливается необходимость разработки соответствующих методов диагностирования.

2. Модель АНПА

Формальная модель установившегося пространственного движения АНПА обычно строится с использованием одной неподвижной относительно Земли системы координат, ориентированной по навигационной базе, а также двух подвижных с началом координат в центре масс аппарата: связанной с корпусом АНПА и поточной (скоростной) [2, 3]. Взаимная ориентация координатных осей определяется углами курса, крена, дифферента, атаки, дрейфа, а также углами траектории.

Структурная схема, соответствующая уравнениям движения, показана на рис. 3 [3]. Для формирования закона управления используются четыре датчика: глубиномер (W_7), акселерометр (W_9), датчик дифферента (W_{11}), датчик угловой скорости (W_{13}). Перечисленные выше датчики используются для оценки следующих величин: глубины погружения (H),

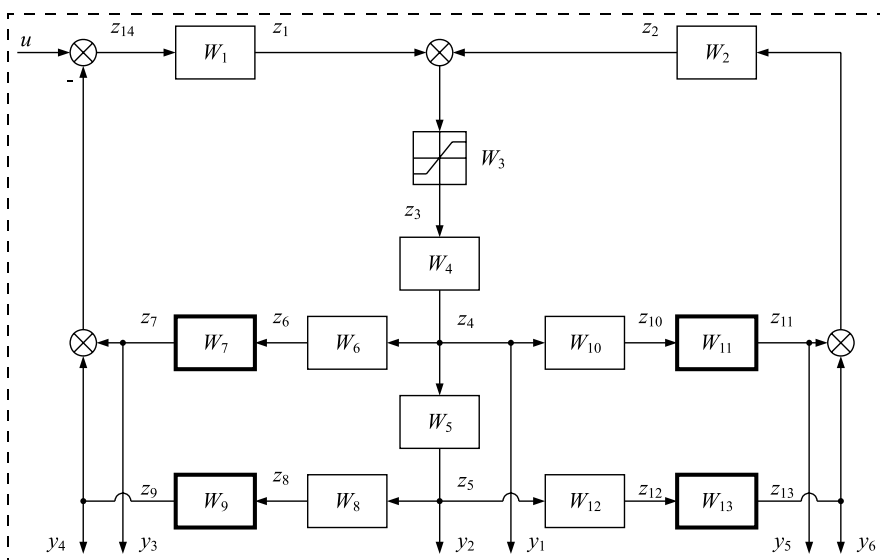


Рис. 3. Структурная схема СУ АНПА канала управления по глубине

ускорения при погружении/всплытии ($\ddot{H}$), угла дифферента (ψ), скорости изменения угла дифферента ($\dot{\psi}$).

Передаточные функции рассматриваемой системы имеют следующий вид:

$$W_1(p) = K_H, W_2(p) = K_\psi, W_4(p) = K_T, W_5(p) = d,$$

$$W_6(p) = -\frac{v(J_{z1}p^2 - \bar{M}_z^\omega p - \bar{M}_z^\alpha - M_0)}{p\Delta(p)},$$

$$W_7(p) = K_7, W_8(p) = -\frac{v(\bar{R}_y^\alpha + \bar{R}_y^\omega p)}{p\Delta(p)},$$

$$W_9(p) = K_9, W_{10}(p) = -\frac{\bar{M}_z^\alpha}{\Delta(p)},$$

$$W_{11}(p) = K_{11}, W_{12}(p) = \frac{(m_y v p + \bar{R}_y^\alpha)}{\Delta(p)}, W_{13}(p) = K_{13},$$

где K_H и K_ψ — коэффициенты усиления по глубине и дифференту.

Характеристический многочлен разомкнутой системы $\Delta(p)$ представляется следующим уравнением:

$$\Delta(p) = J_{z1}m_y v p^3 + (J_{z1}\bar{R}_y^\alpha - m_y v \bar{M}_z^\omega) p^2 + (\bar{M}_z^\alpha \bar{R}_y^\omega - \bar{M}_z^\omega \bar{R}_y^\alpha - (\bar{M}_z^\alpha - M_0)m_y v) p - M_0 \bar{R}_y^\alpha.$$

Здесь $\bar{R}_y$, $\bar{M}_z$ — приведенные к квадрату поступательной скорости гидродинамические силы и моменты, действующие на АНПА в скоростной системе координат; M_0 — удельный момент остойчивости, отнесенный к углу дифферента; m_y , J_{z1} — массы и моменты инерции аппарата с учетом присоединенных масс жидкости; T_{y1} — составляющая суммарного упора винтов; d — плечо приложения управляющего момента относительно центра масс; H — глубина погружения; ψ — угол дифферента; v — скорость движения АНПА. Индексы α и β в обозначениях указывают на то, что силы и моменты являются позиционными, а индекс ω обозначает демпфирующие составляющие гидродинамических сил и моментов.

Коэффициент передачи K_T определяется по формуле

$$K_T = \frac{C_1(2\bar{K}_1^0 + \mu v)}{2\tau\bar{n} - \varepsilon_0},$$

где $\varepsilon_0 = v\omega - 1$, $v = K_2^\lambda n_{1\rho} D^4$, $\tau = K_2^0 n_{1\rho} D^5$, $\bar{n} = \frac{\varepsilon_0 + \sqrt{\varepsilon_0^2 + 4n_0\tau}}{2\tau}$; C_1 — подбираемый коэффициент

следящей системы; коэффициенты K_1^0 , K_2^0 и K_2^λ — табличные значения, зависящие от шагового отношения винта; n_0 — частота вращения винта при хо-

лостом ходе; n_1 — нагрузочный коэффициент момента двигателя; ρ — плотность воды; μ — удельный расход жидкости через сечение винта; D — диаметр винта.

3. Построение банка наблюдателей

Для решения задачи диагностирования модель канала управления по глубине будем представлять в следующем общем виде:

$$z(p) = F(p, \xi)z(p) + Gu(p), y(p) = Hz(p), \quad (1)$$

где компоненты вектора z размерности n представляют собой сигналы на выходах отдельных звеньев; u — вектор входа (управления) размерности m ; y — вектор выхода размерности l ; F — матрица размера $n \times n$, содержащая передаточные функции (ПФ) отдельных звеньев и статические нелинейности (СН); G и H — постоянные матрицы размеров $n \times m$ и $l \times n$ соответственно; ξ — вектор, отвечающий за учет влияния дефектов в ПФ и СН: если в i -й ПФ или СН возник дефект, состоящий в искажении параметров этой ПФ или СН, то $\xi_i = 1$, в противном случае $\xi_i = 0$. Обозначим ξ_0 вектор со всеми нулевыми компонентами, что соответствует исправной системе.

В выражении (1) под произведением вида $F(p)z(p)$ понимается следующее: если F_{ij} — передаточная функция, то элемент $F_{ij}(p)z_j(p)$ понимается как обычное произведение ПФ $F_{ij}(p)$ и переменной $z_j(p)$, если F_{ij} — статическая нелинейность, то $F_{ij}z_j(p)$ — это нелинейная функция F_{ij} с аргументом $z_j(p)$; здесь F_{ij} — элемент матрицы F , стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, z_j — j -я компонента вектора z .

Если матрица G содержит ПФ или СН, то переход к постоянной матрице можно осуществить путем расширения вектора z следующим образом. Пусть $G_{ij}(p) = W_*(p)$, т. е. в правую часть уравнения для переменной z_i входит слагаемое $W_*(p)u_j(p)$. Введем новую $(n+1)$ -ю компоненту вектора z , такую что справедливо равенство $z_{n+1}(p) = u_j(p)$, и в правой части уравнения для переменной z_i слагаемое $W_*(p)u_j(p)$ заменим на $W_*(p)z_{n+1}(p)$, для чего примем $F_{i, n+1}(p) = W_*(p)$, $F_{n+1, k}(p) = 0$, $k = 1, 2, \dots, n+1$, $G_{ij}(p) = 0$ и $G_{n+1, j}(p) = 1$. Аналогичные операции проводятся для каждой ПФ или СН, входящей в матрицу G , в результате чего размерность системы возрастает на число таких ПФ и нелинейностей.

Для решения задачи обнаружения и локализации дефектов воспользуемся известными методами; для рассматриваемого класса систем они описаны в работе [4]. Матрицы модели (1) для рассматриваемой системы имеют большие размеры и являются сильно разреженными, поэтому зададим их ненулевыми элементами. Поскольку матрица G содержит ПФ W_1 , введем переменную z_{14} , удовлетворяющую уравнению $z_{14}(p) = u(p) - z_7(p) - z_9(p)$, при этом $z_1(p) = W_1 z_{14}(p)$; новый вид матриц F и G определяется описанным выше образом.

Матрица F размером (14×14) содержит следующие ненулевые элементы: $F_{1,14} = W_1$; $F_{2,11} = W_2$; $F_{2,13} = W_2$; $F_{3,1} = W_3$; $F_{3,2} = W_3$; $F_{4,3} = W_4$; $F_{5,4} = W_5$; $F_{6,4} = W_6$; $F_{7,6} = W_7$; $F_{8,5} = W_8$; $F_{9,8} = W_9$; $F_{10,4} = W_{10}$; $F_{11,10} = W_{11}$; $F_{12,5} = W_{12}$; $F_{13,12} = W_{13}$; $F_{14,7} = -1$; $F_{14,9} = -1$. Ненулевыми элементами матрицы H размером (6×14) являются: $H_{1,4} = 1$; $H_{2,5} = 1$; $H_{3,7} = 1$; $H_{4,9} = 1$; $H_{5,11} = 1$; $H_{6,13} = 1$. Единственный ненулевой элемент матрицы G размером (14×1) — это $H_{14,1} = 1$.

Устройство диагностирования (УД) будем искать в виде банка диагностических наблюдателей, каждый из которых описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} z^*(p) &= F^*(p)z^*(p) + G^*(p)u(p) + S(p)y(p), \\ y^*(p) &= H^*z^*(p); \end{aligned} \quad (2)$$

здесь символом "*" отмечены матрицы и векторы, описывающие рассматриваемый наблюдатель. Решение о наличии или отсутствии дефекта принимается на основе анализа сигналов невязки $r_i = y_i - y_i^*$.

В результате реализации предложенного в работе [4] алгоритма получаем набор множеств, содержащих номера компонент вектора z , необходимых для построения банка наблюдателей: $N^{(1)} = \{4, 3, 1, 2, 14\}$, $N^{(2)} = \{5\}$, $N^{(3)} = \{7, 6\}$, $N^{(4)} = \{9, 8\}$, $N^{(5)} = \{11, 10\}$, $N^{(6)} = \{13, 12\}$. Можно также сказать, что эти множества содержат номера компонент вектора z , на дефекты которых настроен разрабатываемый наблюдатель. Задачей является диагностирование датчиков системы — ПФ W_7 , W_9 , W_{11} , W_{13} , выходами которых являются компоненты вектора z с номерами (7, 9, 11, 13), входящие в состав множеств $N^{(3)}$, $N^{(4)}$, $N^{(5)}$ и $N^{(6)}$. Поэтому наблюдатели, задаваемые множествами $N^{(1)}$ и $N^{(2)}$, строиться не будут.

На основе множеств $N^{(3)}$, $N^{(4)}$, $N^{(5)}$ и $N^{(6)}$ по методике, описанной в работе [4], получим матрицы описания устройств диагностирования (2), входящих

в банк наблюдателей. Описание наблюдателя, соответствующего множеству $N^{(3)}$, имеет следующий вид:

$$F_3 = \begin{pmatrix} 0 & W_7 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, S_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ W_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, G_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, H_3 = (1 \ 0).$$

Множеству $N^{(4)}$ соответствует описание второго наблюдателя:

$$F_4 = \begin{pmatrix} 0 & W_9 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, S_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, G_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, H_4 = (1 \ 0);$$

множеству $N^{(5)}$ — третьего:

$$F_5 = \begin{pmatrix} 0 & W_{11} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, S_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ W_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, G_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, H_5 = (1 \ 0);$$

множеству $N^{(6)}$ — четвертого:

$$F_6 = \begin{pmatrix} 0 & W_{13} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, S_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, G_6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, H_6 = (1 \ 0).$$

На основе состава множеств $N^{(i)}$ можно получить таблицу диагностируемых дефектов, которая характеризует полученную в результате решения задачи диагностирования глубину поиска дефектов. Из таблицы следует, что удастся различить дефекты всех датчиков между собой, но дефекты внутри групп $\{7, 6\}$, $\{9, 8\}$, $\{11, 10\}$, $\{13, 12\}$ остались неразличимы.

Наблюдатели	Диагностируемые дефекты
Третий	7, 6
Четвертый	9, 8
Пятый	11, 10
Шестой	13, 12

4. Результаты моделирования

Совместное моделирование СУ АНПА с построенным банком наблюдателей проводили с помощью пакета MATLAB + Simulink фирмы Mathwork Inc. Для проведения моделирования были использованы номинальные параметры, соответствующие СУ АНПА "МТ-88" канала управления по глубине [2, 3]. Гидродинамические характеристики АНПА "МТ-88":

$$J_{z1} = 1820 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, m_y = 1760 \text{ кг},$$

$$\bar{M}_{z1}^\alpha = 237 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2}, \bar{M}_{z1}^\omega = -710 \text{ Н} \cdot \text{с}^2,$$

$$M_0 = -50 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\bar{R}_y^\alpha = 334 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2}, \bar{R}_y^\omega = 429 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2}.$$

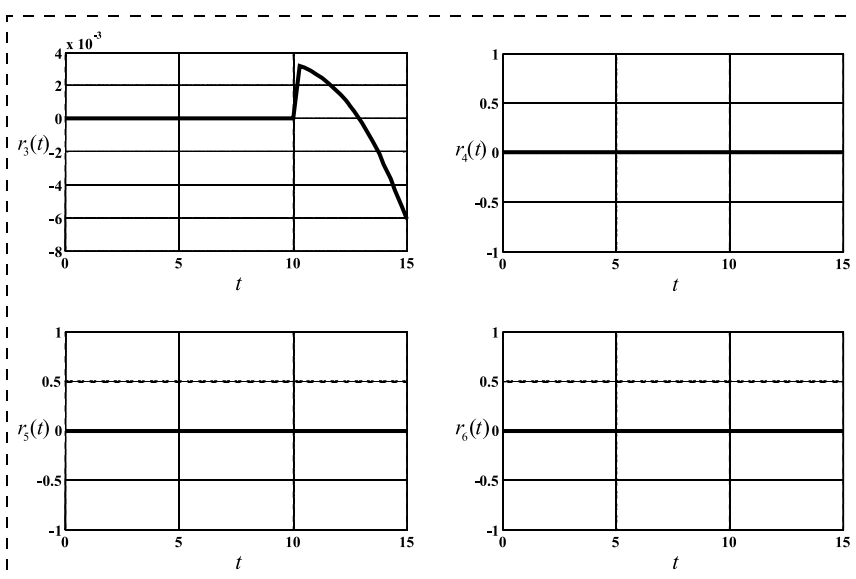


Рис. 4. Поведение сигналов невязки $r_3(t) - r_6(t)$ при наличии дефекта датчика W_7

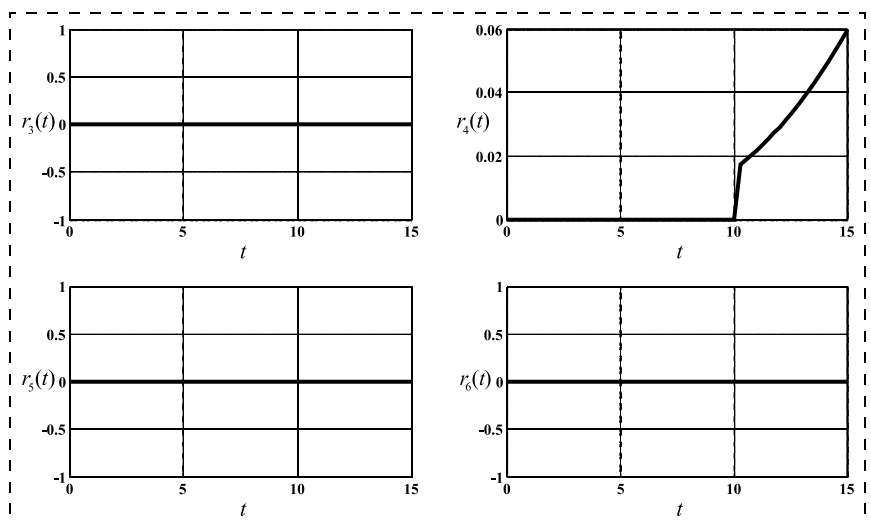


Рис. 5. Поведение сигнала невязки $r_3(t) - r_6(t)$ при наличии дефекта датчика W_9

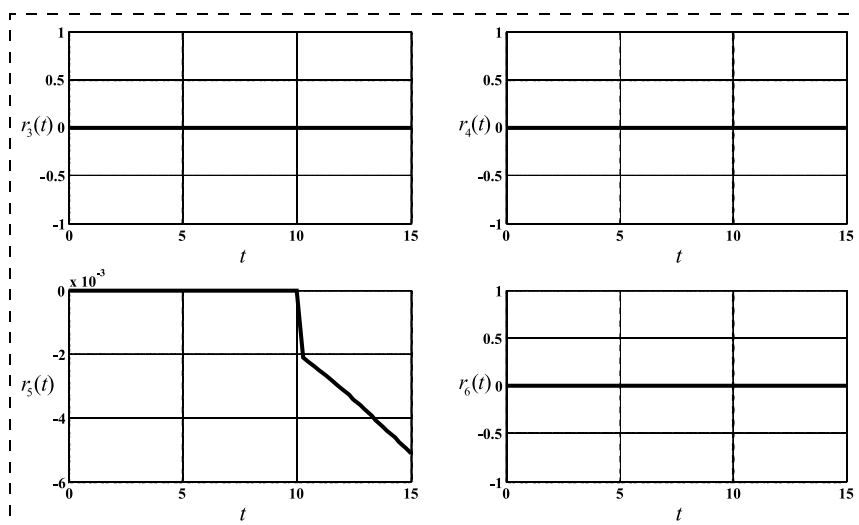


Рис. 6. Поведение сигнала невязки $r_3(t) - r_6(t)$ при наличии дефекта датчика W_{11}

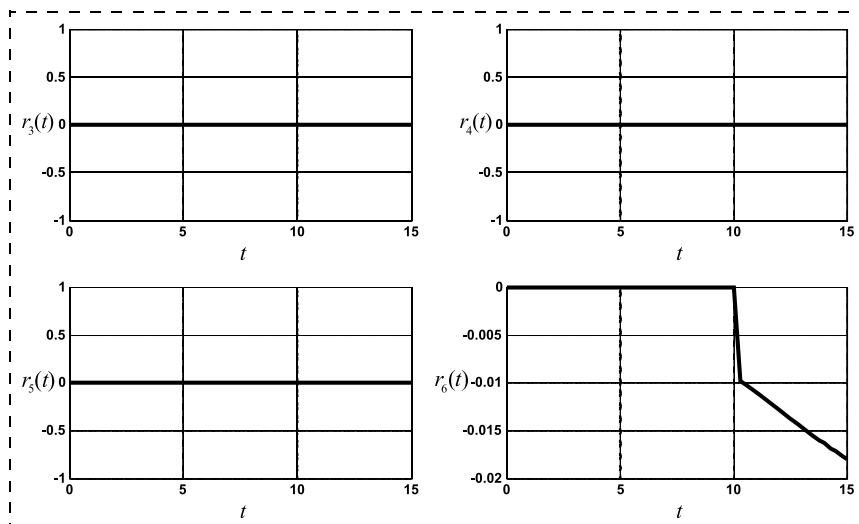


Рис. 7. Поведение сигнала невязки $r_3(t) - r_6(t)$ при наличии дефекта датчика W_{13}

Параметры и коэффициенты, принятые при проведении моделирования: $v = 1$ м/с, $d = -1,5$ м, $K_H = 0,8$, $K_w = 4$, $K_7 = 0,89$, $K_9 = 0,92$, $K_{11} = 0,95$, $K_{13} = 0,9$, уровень ограничения передаточной характеристики усилителя (звено W_3) — ± 1 . Коэффициенты, использованные для расчета K_T :

$$C_1 = 10, K_1^0 = 0,1344 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$K_2^\lambda = 0,033,$$

$$n_0 = 31,1667 (\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с})^{-1},$$

$$n_1 = 34,667 (\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с})^{-1},$$

$$\tau = 0,0742 \text{ с}, \rho = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

$$\mu = 1,15 \text{ кг}, D = 0,15 \text{ м}.$$

Внезапный дефект моделировался скачкообразным изменением коэффициентов усиления датчиков на 10 % в момент времени $t = 10$.

Результаты моделирования реакции банка наблюдателей на изменение передаточной функции W_7 (глубиномер) представлены на рис. 4. Поведение сигналов невязки при изменении передаточной функции W_9 (акселерометр) показано на рис. 5.

Реакция банка наблюдателей на возникновение дефектов датчика дифферента (W_{11}) представлена на рис. 6, датчика угловой скорости (W_{13}) — на рис. 7.

Результаты моделирования подтверждают полученную ранее на основе состава множеств $N^{(i)}$ оценку глубины поиска дефектов (см. таблицу).

Заключение

В работе приведено решение задачи диагностирования дефектов датчиков системы управления необитаемого подводного аппарата. Метод позволяет решить задачу диагностирования с использованием единого подхода как для линейных, так и нелинейных систем (содержащих статические нелинейности). Особенности метода обусловлены способом описания системы в виде структурной схемы, содержащей передаточные функции и статические нелинейности.

Список литературы

1. Frank P. M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis — a survey and some new results // *European Journal of Control*. 1996. Vol. 2. P. 6—28.
2. Автономные необитаемые подводные аппараты / Под общ. ред. акад. М. Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 272 с.
3. Агеев М. Д., Касаткин Б. А., Киселев Л. В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.

4. Жирабок А. Н., Якшин А. С. Диагностирование технических систем, заданных структурными схемами с нелинейными звеньями // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2006. № 9. С. 36—44.
5. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. СПб.: МГУ-Гриф. 1998. 256 с.
6. Жирабок А. Н., Писарец А. М. Диагностирование датчиков подводных роботов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. № 9. С. 15—21.

Solution to the Problem of the Sensor Fault Diagnosis in the Unmanned Underwater Vehicle Control Systems

A. N. Zhirabok, zhirabok@mail.ru✉,

Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690990, Russian Federation,

A. S. Yakshin, yakshin_as@mail.ru, Erlang Nord-West, St. Petersburg, 194354, Russian Federation

Corresponding author: Zhirabok Aleksei N., Ph. D., Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690990, Russian Federation, e-mail: zhirabok@mail.ru

Received on July 09, 2015

Accepted on July 23, 2015

The article presents the problem of the sensor fault diagnosis in the unmanned underwater vehicle control systems described by means of the structure schemes including blocks with transfer functions and static nonlinearities. One of the most important components of the control system of the unmanned underwater vehicles is navigational sensors. The problem of a timely detection of faults in this group of sensors is very important. Faults in the sensors may cause incorrect execution of the task or even loss of a vehicle. The sensor fault detection and isolation in the unmanned underwater vehicles control system is based on the concept of an analytical redundancy. Analytical redundancy includes two or more ways to determine the values of the variables of the system, one of which uses a mathematical model, presented in an analytical form. One of the methods of the system diagnosis based on analytical redundancy is the observer-based approach. Diagnostic observers are based on a mathematical model of the diagnosed object. The decision is based on the analysis of the residuals generated as a result of mismatch between the outputs of the sensors and the outputs of the observers. In a healthy system the residuals are close to zero. When a fault occurs, the residuals become significantly different from zero. The problem of interest to us is development of a fault isolation observer-based procedure with an accuracy of a block of the initial system (if this is possible). Let us assume that only input and output signals are available for diagnosis. The reason for these restrictions is that a model of the initial system does not go through any nontrivial linear transformations. Therefore, this approach can be used in a nonlinear case.

Keywords: nonlinear systems, structure schemes, transfer functions, static nonlinearities, fault detection and isolation, observer-based approach, unmanned underwater vehicle, sensor of the control system

For citation:

Zhirabok A. N., Yakshin A. S. Solution to the Problem of the Sensor Fault Diagnosis in the Unmanned Underwater Vehicle Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 11, pp. 777—782.

DOI: 10.17587/mau/16.777-782

References

1. Frank P. M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis — a survey and some new results, *European Journal of Control*, 1996, vol. 2, pp. 6—28.
2. Ageev M. D. ed. *Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty* (Autonomous unmanned underwater vehicles), Vladivostok, Dal'nauka, 2000, 272 p. (in Russian).

3. Ageev M. D., Kasatkin B. A., Kiselev L. V. *Avtomaticheskie podvodnye apparaty* (Automatic underwater vehicles), Leningrad, Sudostroenie, 1981, 224 p. (in Russian).
4. Zhirabok A. N., Yakshin A. S. *Diagnostirovanie tekhnicheskikh sistem, zadannykh strukturnymi shemami s nelinejnymi zvenjami* (Fault diagnosis of technical systems described by structure scheme with nonlinear blocks), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2006, no. 9, pp. 36—44 (in Russian).
5. Mironovskii L. A. *Funkcional'noe diagnostirovanie dinamicheskikh sistem* (Functional diagnosis of dynamic systems), St. Petersburg, MGU-Grif, 1998, 256 p. (in Russian).
6. Zhirabok A. N., Pisarets A. M. *Diagnostirovanie datchikov podvodnykh robotov* (Sensor diagnosis of underwater vehicles), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no. 9, pp. 15—21 (in Russian).