УДК 681.51
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-70-79

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ СБОЕВ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА БЕЗЭКИПАЖНОМ НАДВОДНОМ СУДНЕ

Д. А. Галкина[1], А. А. Маргун[1,2*]

[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[*]*aamargun@itmo.ru*
[2]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Рассматривается решение задачи обнаружения отказов датчиков инерциальной навигационной системы безэкипажного надводного судна. Предложен алгоритм, основанный на наблюдателе состояния полного порядка. Введено условие обнаружения отказов, базирующееся на векторе сигнала рассогласования и пороговом значении. Для выявления вышедшего из строя датчика применяются направленные генераторы сигналов рассогласования. Предлагаемый алгоритм применен к модели судна Номото второго порядка. В качестве исследуемых на отказы датчиков выбраны измерители угловой и линейной скоростей. В процессе синтеза алгоритма обнаружения отказов построены два наблюдателя, каждый из которых чувствителен к отказам отдельного датчика. Приведены результаты компьютерного моделирования в программном пакете MatLab Simulink, подтвердившие эффективность и работоспособность предложенного подхода. Разработанный алгоритм позволяет обнаруживать отказы датчиков инерциальной навигационной системы без задействования дополнительных средств измерения, что способствует сокращению расходов на обслуживание и диагностику, а также уменьшению времени обнаружения неполадок.

Ключевые слова: *надводное судно, безэкипажное судно, модель Номото, обнаружение отказов, диагностирование, инерциальная навигационная система*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-79-10071; https://rscf.ru/project/23-79-10071/.

Ссылка для цитирования: *Галкина Д. А., Маргун А. А.* Алгоритм обнаружения сбоев инерциальной навигационной системы на безэкипажном надводном судне // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 1. С. 70—79. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-70-79.

ALGORITHM FOR DETECTING FAILURES OF AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM ON AN UNMANNED SURFACE VESSEL

D. A. Galkina[1], A. A. Margun[1,2*]

[1]*ITMO University, St. Petersburg, Russia*
**aamargun@itmo.ru*
[2]*Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*

Abstract. The solution to the problem of detecting failures of sensors in the inertial navigation system of an unmanned surface vessel is considered. An algorithm based on a full order state observer is proposed. A failure detection condition is introduced based on the mismatch signal vector and threshold value. To detect a failed sensor, directional mismatch signal generators are used. The proposed algorithm is applied to the second-order Nomoto vessel model. Angular and linear velocity meters were selected as sensors tested for failures. In the process of synthesis of the failure detection algorithm, two observers were constructed, each of which is sensitive to failures of an individual sensor. Results of computer simulation in the MatLab Simulink software package are presented, confirming the effectiveness and efficiency of the proposed approach. The developed algorithm makes it possible to detect failures of inertial navigation system sensors without using additional measuring instruments, which helps reduce maintenance and diagnostic costs, as well as reduce the time spent on detecting problems.

Keywords: surface vessel, unmanned vessel, Nomoto model, failure detection, diagnostics, inertial navigation system

Acknowledments: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-79-10071; https://rscf.ru/project/23-79-10071/.

© Галкина Д. А., Маргун А. А., 2024

For citation: Galkina D. A., Margun A. A. Algorithm for detecting failures of an inertial navigation system on an unmanned surface vessel. *Journal of Instrument Engineering.* 2024. Vol. 67, N 1. P. 70—79 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-70-79.

Введение. Влияние научно-технического прогресса заметно сказывается на изменениях в абсолютно разных отраслях, в том числе в области судостроения. Необходимость соответствовать актуальным мировым стандартам способствует активному проведению исследований, модернизации существующих систем и появлению инновационных решений в судостроительной отрасли, в частности распространению безэкипажных судов. Однако это также способствует возникновению все более сложных систем, состояние которых требуется тщательно контролировать.

Диагностика состояния различных систем не теряет актуальности и играет важную роль в обеспечении надежного функционирования судна в целом. В качестве примера рассмотрим безэкипажное судно, оснащенное инерциальной навигационной системой (ИНС), включающей в себя микроэлектромеханический гироскоп и акселерометр. Данные системы используются для повышения точности измерения текущих координат путем комплексирования данных со спутниковыми навигационными системами (СНС). Также ИНС применяются для обеспечения требуемой точности позиционирования подвижных объектов при исчезновении сигналов СНС на достаточно длительных интервалах времени [1—3]. Несвоевременное обнаружение выхода акселерометра из строя повлечет за собой невозможность определения угла наклона судна и линейного ускорения, что может привести к критическим последствиям. Отказ в работе гироскопа, в свою очередь, приведет к ошибке измерения угловой скорости судна, что особенно критично при использовании автопилота.

Проблемы обнаружения отказов датчиков подробно рассматриваются в работах [4—10]. Значительная часть решений базируется на использовании аппарата оптимальной фильтрации. Полученные решения показывают хорошие результаты при стохастическом характере погрешности [11]. Однако выход из строя датчиков может приводить к ошибкам измерений, которые не описываются с достаточной точностью вероятностным распределением или имеют быстро меняющиеся параметры.

Обнаружению отказов двигателя постоянного тока посвящена работа [11]. Представленный метод базируется на применении набора наблюдателей Люенбергера полного порядка. Данный подход использован и в настоящей статье, где представлено решение задачи обнаружения отказов датчиков линейной и угловой скоростей в условиях работы на безэкипажном надводном судне. Выявление вышедшего из строя датчика производится с помощью наблюдателей и направленных генераторов сигналов рассогласования. Особенностью предложенного решения является сохранение работоспособности при существенно нестационарных или нестохастических погрешностях измерений. Для реализации алгоритма не требуется знать статистические характеристики сигналов при отказах, алгоритм нечувствителен к их изменениям.

Постановка задачи. Построение подробной математической модели надводного судна, приближенной к реальности, представляет собой достаточно сложную задачу вследствие наличия внешних возмущений, параметрических, структурных и сигнальных неопределенностей, а также нелинейного характера гидродинамических сил и моментов, отражающих динамику судна [12]. Существует ряд упрощенных моделей, которые используются для описания динамики судов: нелинейная модель Норбина [13], модели Номото первого и второго порядков [14, 15], модели движения корабля с учетом качки [16, 17]. Для наглядности и простоты изложения в настоящей статье рассматривается динамика судна, описываемая моделью

Номото второго порядка. Отметим, что предлагаемое решение может быть применено и для других линейных моделей.

Математическая модель движения судна рассматривается в связанной с центром масс O судна системе координат, оси X, Y, Z которой сонаправлены осям симметрии корпуса (рис. 1). На рисунке также отображены: K, M, L — продольный, горизонтальный и нормальный моменты силы вдоль осей OX, OY и OZ соответственно, а также v, d, u — поперечная, угловая и продольная скорость судна соответственно.

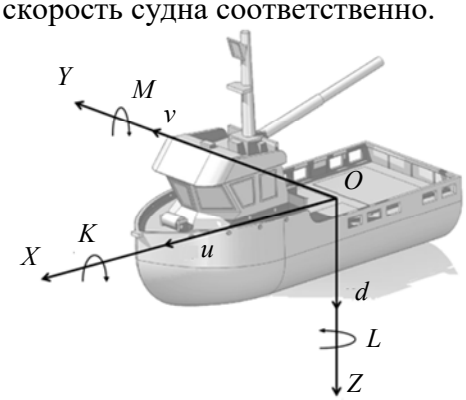

Рис. 1

В рамках исследования принято допущение, что продольная скорость судна ($u = u_0$) — известная постоянная величина. В этом случае динамические уравнения движения в связанной системе координат могут быть записаны следующим образом [20]:

$$m\left(\dot{v} + u_0 d + x_G \dot{d}\right) = Y_v v + Y_d d + Y_\delta \delta_R + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{d}} \dot{d}; \tag{1}$$

$$I_z \dot{d} + m x_G \left(\dot{v} + u_0 d\right) = N_v v + N_d d + N_\delta \delta_R + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{d}} \dot{d}, \tag{2}$$

где m — масса судна; x_G — продольная координата центра тяжести; Y — компонент поперечных гидродинамических сил; N — компонент продольных гидродинамических сил; I_z — присоединенный момент инерции; δ_R — угол поворота руля.

Уравнения движения (1) и (2) также могут быть представлены в матричном виде:

$$M_R \dot{x} + N_R\left(u_0\right) x = B_R \delta_R, \tag{3}$$

где M_R — матрица инерции твердого тела; N_R — матрица кориолисовых и центробежных сил; x — вектор скоростей; B_R — вектор внешних сил и моментов.

Матрицы модели (3) имеют следующий вид:

$$M_R = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m - Y_{\dot{d}} \\ m x_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{d}} \end{bmatrix}; \tag{4}$$

$$N_R\left(u_0\right) = \begin{bmatrix} -Y_v & m u_0 - Y_d \\ -N_v & m x_G u_0 - N_{\dot{d}} \end{bmatrix}; \tag{5}$$

$$B_R = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$x = \begin{bmatrix} v \\ d \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Таким образом, модель судна может быть представлена в форме вход—состояние—выход:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\delta_R; \\ y &= Cx, \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

где $A = -M_R^{-1} N_R(u_0) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$, $B = M_R^{-1} B_R$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Целью настоящего исследования является синтез алгоритма, позволяющего производить онлайн обнаружение и локализацию отказов датчиков линейной и угловой скоростей ИНС для безэкипажного судна, динамическая модель которого описывается уравнением (8).

Алгоритм обнаружения отказов. Рассмотрим динамическую модель измерений при отказах датчиков ИНС.

Модель (8) при наличии отказа описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\delta_R \ ; \\ y &= Cx + I_i \begin{bmatrix} f_a \\ f_g \end{bmatrix}, \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

где f_a — неизвестный сигнал отказа акселерометра, f_g — неизвестный сигнал отказа гироскопа, $I_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Для реализации алгоритма обнаружения отказов датчиков линейной и угловой скоростей используем наблюдатель Люенбергера [11, 21]:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B\delta_R + K\left(y - \hat{y}\right), \\ \hat{y} &= C\hat{x}. \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Уравнение для сигнала рассогласования между показаниями датчика y и выходного сигнала наблюдателя $\hat{y}$ имеет следующий вид:

$$r = y - \hat{y} = C\left(x - \hat{x}\right) = Ce, \tag{11}$$

где e — ошибка оценки состояния.

Из уравнений (9), (10) получим динамическую модель сигнала рассогласования:

$$\left.\begin{aligned} \dot{e} &= \left(A - KC\right)e + l_i f_i; \\ r &= Ce, \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

где f_i — сигнал отказа i-го датчика; l_i — вектор, отражающий влияние сигнала отказа на ошибку оценки состояния и, следовательно, на сигнал рассогласования; векторы l_i назовем направлениями отказов в пространстве рассогласования.

Введем условие обнаружения отказов:

$$r = \begin{cases} r, & \text{если } |r| \geq \Delta; \\ 0, & \text{если } |r| \leq \Delta, \end{cases}$$

где Δ — пороговое значение чувствительности; данное условие необходимо для предотвращения ложных срабатываний, вызываемых шумами измерений и параметрическими отклонениями.

После успешного выявления отказа датчика его необходимо локализовать — определить, какой из датчиков вышел из строя. Для решения поставленной задачи построим два наблюдателя (*1* и *2*), каждый из которых будет чувствителен к отказу отдельного датчика. Схема локализации отказов приведена на рис. 2.

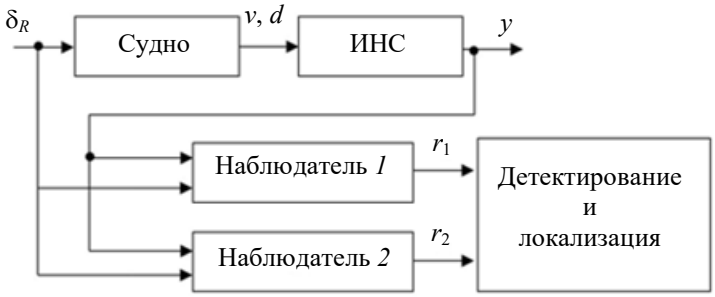

Рис. 2

К синтезируемым наблюдателям был выставлен ряд условий [22].

Условие 1. Выполнение равенства $\operatorname{rank}\left[l_i;\ (A-KC)l_i\right]=1$ позволит обеспечить изменение вектора r строго в одном направлении l_i в двумерном пространстве рассогласования.

Условие 2. Для обеспечения устойчивости наблюдателя матрица $(A-KC)$ должна быть гурвицевой.

Условие 3. Все векторы Cl_i должны быть линейно независимыми для возможности локализации отказов.

Отказ акселерометра. Данный отказ заключается в сбое датчика линейного ускорения, что, в свою очередь, влечет за собой погрешность измерения линейной скорости.

Модель (8) при наличии отказа акселерометра описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B\delta_R\ ,\\ y &= Cx + \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} f_a .\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Динамическая модель ошибки в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{gathered}\dot{e} = (A - K_a C)e + l_a f_a, K_a = \begin{bmatrix}k_{11} & k_{12}\\ k_{21} & k_{22}\end{bmatrix},\\ l_a = K_a C\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}k_{11}\\ k_{21}\end{bmatrix}.\end{gathered} \tag{14}$$

Зададим $k_{11}=1$ и выполним проверку требуемых условий:

$$\operatorname{rank} U = \operatorname{rank}\left[l_a\ (A-K_aC)l_a\right] = \operatorname{rank}\begin{bmatrix}k_{11} & (a_{11}-k_{11})k_{11}+(a_{12}-k_{12})k_{21}\\ k_{21} & (a_{21}-k_{21})k_{11}+(a_{22}-k_{22})k_{21}\end{bmatrix} = 1. \tag{15}$$

Ввиду невозможности выбрать коэффициенты k_{12} и k_{22}, способные обеспечить линейную зависимость столбцов, так как в этом случае один из полюсов наблюдателя будет равен нулю, было решено обеспечить линейную зависимость строк. В таком случае

$$\frac{k_{11}}{k_{21}} = \frac{(a_{11}-k_{11})k_{11}+(a_{12}-k_{12})k_{21}}{(a_{21}-k_{21})k_{11}+(a_{22}-k_{22})k_{21}}. \tag{16}$$

Приведем подобные и обозначим:

$$n_1 = a_{11}k_{11}k_{21} - k_{11}^2k_{21} + a_{12}k_{21}^2;$$

$$n_2 = a_{21}k_{11}^2 - k_{11}^2k_{21} + a_{22}k_{11}k_{21},$$

тогда связь между k_{12} и k_{22} будет задаваться уравнением

$$k_{12} = \frac{n_1 - n_2 + k_{11}k_{21}k_{22}}{k_{21}^2}. \tag{17}$$

Характеристический полином модели ошибки (12) имеет вид

$$p(s) = s^2 + js + q, \tag{18}$$

где

$$\begin{gathered} j = k_{11} - a_{22} - a_{11} + k_{22}, \\ q = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} - a_{11}k_{22} + a_{12}k_{21} + a_{21}k_{12} - a_{22}k_{11} + k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}, \end{gathered} \tag{19}$$

здесь j и q задаются оператором.

Таким образом, коэффициенты k_{12}, k_{21}, k_{22} рассчитываются как решение системы уравнений (16), (17), (19).

Отказ гироскопа. Данный отказ заключается в сбое датчика угловой скорости, что, в свою очередь, влечет за собой погрешность ее измерения.

Модель (8) при наличии отказа гироскопа описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\delta_R\ , \\ y &= Cx + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f_g . \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

Динамическая модель сигнала рассогласования в таком случае имеет следующий вид:

$$\begin{gathered} \dot{e} = \left(A - K_g C\right)e + l_g f_g, K_g = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{22} & k_{22} \end{bmatrix}, \\ l_g = K_g C \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{12} \\ k_{22} \end{bmatrix}. \end{gathered} \tag{21}$$

Зададим $k_{12} = 1$. Далее проведем проверку условий, предъявляемых к синтезируемому наблюдателю:

$$\operatorname{rank} U = \operatorname{rank}\left[l_g \left(A - K_g C \right) l_g \right] = \operatorname{rank} \begin{bmatrix} k_{12} & \left(a_{11} - k_{11}\right)k_{12} + \left(a_{12} - k_{12}\right)k_{22} \\ k_{22} & \left(a_{21} - k_{21}\right)k_{12} + \left(a_{22} - k_{22}\right)k_{22} \end{bmatrix} = 1. \tag{22}$$

Для выполнения данного условия при ненулевых k_{12} и k_{22} было принято допущение о линейной зависимости строк. Тогда

$$\frac{k_{12}}{k_{22}} = \frac{\left(a_{11} - k_{11}\right)k_{12} + \left(a_{12} - k_{12}\right)k_{22}}{\left(a_{21} - k_{21}\right)k_{12} + \left(a_{22} - k_{22}\right)k_{22}}. \tag{23}$$

Приведем подобные и обозначим:

$$\begin{gathered} n_3 = a_{11}k_{12}k_{22} + a_{12}k_{22}^2; \\ n_4 = a_{21}k_{12}^2 + a_{22}k_{12}k_{22}, \end{gathered}$$

тогда связь между k_{11} и k_{21} будет задаваться уравнением

$$k_{21} = \frac{n_4 - n_3 + k_{11}k_{12}k_{22}}{k_{12}^2}\ . \tag{24}$$

Таким образом, коэффициенты k_{11}, k_{21}, k_{22} рассчитываются как решение системы уравнений (19), (23), (24).

На практике при работе алгоритма будет наблюдаться отклонение вектора рассогласования r от направлений отказов l_i из-за наличия шумов и отклонения параметров судна от

номинальных значений. Поэтому для обеспечения робастности было предложено применить следующую метрику:

$$C_i = \frac{\left| l_i^T r \right|}{\left\| l_i^T \right\|_2 \left\| r \right\|_2}, \tag{25}$$

где C_i — нормализованное значение проекции вектора рассогласования r на направление отказа l_i; большему значению C_i соответствует большая вероятность отказа.

Графический пример процедуры определения датчика с наибольшей вероятностью сбоя приведен на рис. 3. Сравнивая значение C для вектора r и направлений отказов акселерометра l_a и гироскопа l_g, можно сделать вывод, что отказу с наибольшей вероятностью подвержен акселерометр, так как для него значение метрики больше.

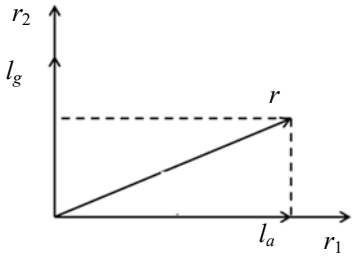

Рис. 3

Результаты/Моделирование. Для проверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено компьютерное моделирование в программной среде MatLab Simulink. Для моделирования были выбраны следующие значения поперечных гидродинамических сил: $Y_v = 5$, $Y_d = 7$, $Y_{\dot{v}} = 5$, $Y_{\dot{d}} = 7$, $Y_u = 4$, и продольных гидродинамических сил: $N_v = 5$, $N_d = 7$, $N_{\dot{v}} = 5$, $N_{\dot{d}} = 7$, $N_u = 4$.

На рис. 4, *а*, *б* соответственно приведены графики линейной и угловой скоростей движения судна, а также результаты их измерения, полученные посредством инерциальной навигационной системы. Анализ графиков показывает, что отказ гироскопа в ходе моделирования происходит в интервале 20—30 с, а отказ акселерометра — в интервале 50—70 с.

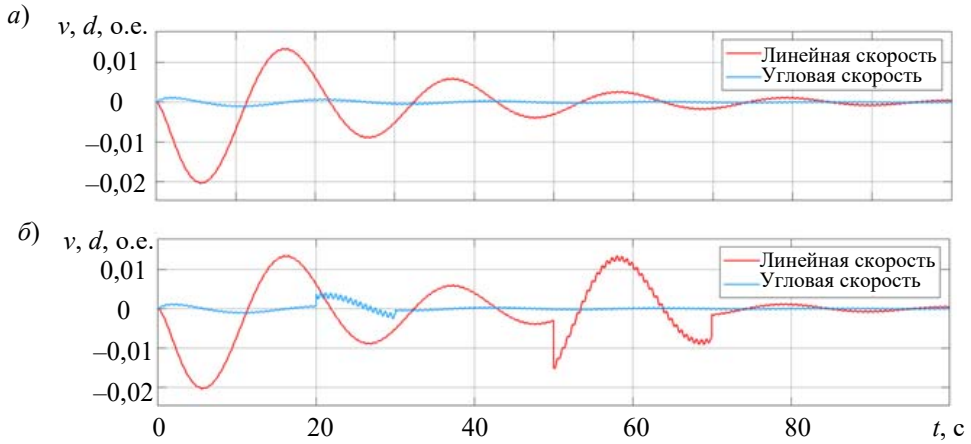

Рис. 4

Изменения векторов рассогласования r_1 и r_2 наблюдателей для гироскопа и акселерометра представлены на рис. 5, *а*, *б*. Как видно из графиков, значения векторов рассогласования соответствуют направлениям l_i в двумерном пространстве рассогласования.

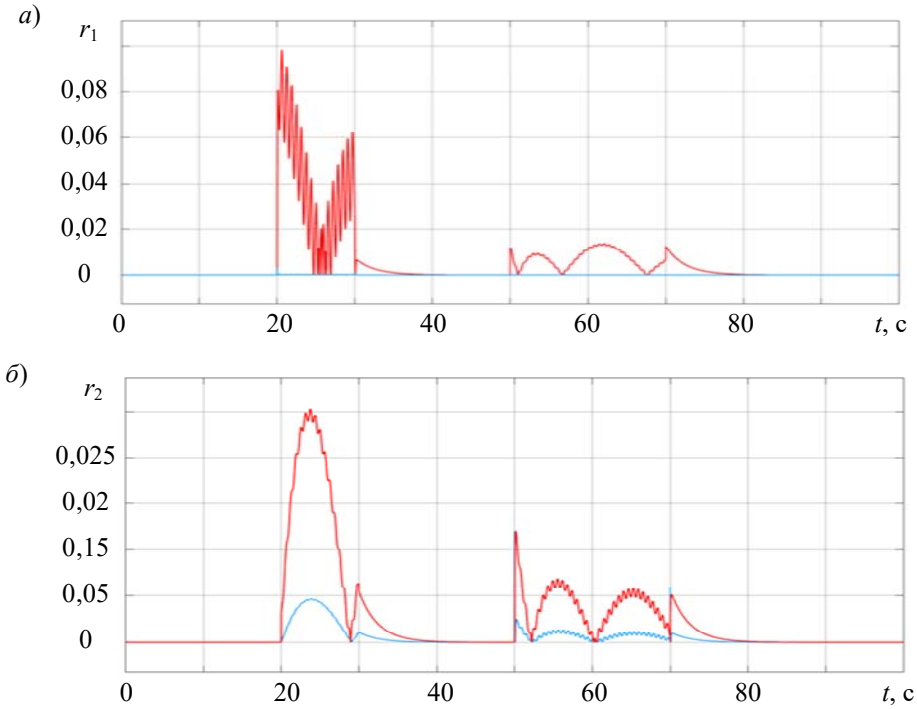

Рис. 5

На рис. 6 приведены изменения оценок отказов с использованием метрики (25). Результаты моделирования показывают работоспособность и эффективность предложенного подхода. Построенная система корректно определяет отказы гироскопа и акселерометра инерциальной навигационной системы.

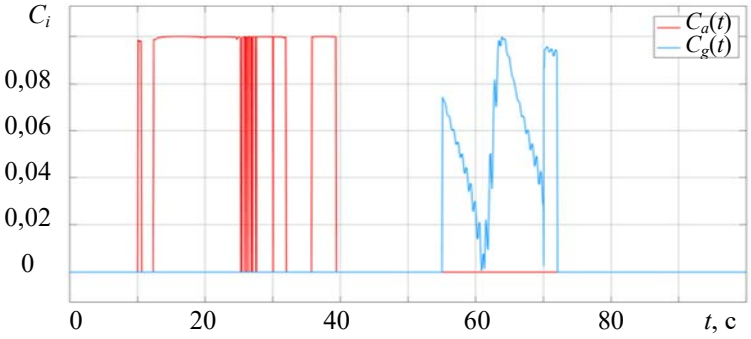

Рис. 6

Заключение. Синтезированный в рамках данной статьи алгоритм позволяет своевременно и эффективно выявлять и локализовывать отказы датчиков линейной и угловой скоростей ИНС для надводного безэкипажного судна. Обнаружение отказов датчиков производится с помощью наблюдателей полного порядка и направленных генераторов сигналов рассогласования. Предложенный алгоритм не основывается на стохастических параметрах погрешности измерений, что обеспечивает его работоспособность при существенно нестационарных или нестохастических воздействиях на измерения, вызванных отказами. Несмотря на то, что в данной статье алгоритм был применен к математической модели судна, предлагаемое решение может быть использовано и для других линейных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анучин О. Н., Емельянцев Г. И.* Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб: Электроприбор, 2003. 390 с.

2. *Лян Ц., Литвиненко Ю. А., Степанов О. А.* Метод обработки измерений от двух блоков микромеханических гироскопов при решении задачи ориентации // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26, № 2(101). С. 29—42.

3. *Литвиненко Ю. А.* Оптимизация алгоритмов инерциальной навигационной системы морских объектов: Автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб: 2005.

4. *Kusic G. L.* State Estimation and Fast Fault Detection For Ship Electrical Systems // IEEE Electric Ship Technologies Symp. 2007. P. 209—214.

5. *Wu N. E., Thavamani S., Zhang Y., Blanke M.* Sensor fault masking of a ship propulsion system // Control Engineering Practice. 2006. Vol. 14. P. 1337—1345.

6. *Samy I., Postlethwaite I., Gu D. W.* Survey and application of sensor fault detection and isolation schemes // Control Engineering Practice. 2011. Vol. 19. P. 658—674.

7. *Perera L. P.* Marine Engine Centered Localized Models for Sensor Fault Detection under Ship Performance Monitoring // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, N 28. P. 91—96.

8. *Babaei M., Shi J., Abdelwahed S.* A Survey on Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods in Electric Ship Power Systems // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 9430—9441.

9. *Roumeliotis S. I., Sukhatme G., Bekey G. A.* Sensor fault detection and identification in a mobile robot // Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 1998. Vol. 3. P. 1383—1388.

10. *Khalastchi E., Kalech M., Rokach L.* A hybrid approach for fault detection in autonomous physical agents // Proc. of the 2014 Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2014. P. 941—948.

11. *Колесник Н. С., Маргун А. А.* Алгоритм детектирования и локализации отказов двигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 492—500.

12. *Лукомский Ю. А., Пешехонов В. Г., Схороходов Д. А.* Навигация и управление движением судов. СПб: Элмор, 2002. 360 с.

13. *Norrbin N. H.* On the design and analysis of the zig-zag test on base of quasi linear frequency response // SSPA Rep. No. B104-3, 10th ITTC, London. 1963. P. 355—374.

14. *Tzeng C., Chen J.* Fundamental properties of linear ship steering dynamic models // Journal of Marine Science and Technology. 1999. Vol. 7, N 2. P. 79—88.

15. *Do K. D., Pan J.* Control of Ships and Underwater Vehicles. London: Springer, 2009. 418 p.

16. *Семенов-Тян-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н.* Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969.

17. *Крылов А. Н.* Избранные труды. Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 804 с.

18. *Abkowitz M. A.* Lectures on ship hydrodynamics steering and manoeuvrability // Techn. Rep. Hy-5; Hydro and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark. 1964.

19. *Юдин Ю. И., Степахно А. Г., Гололобов А. Н.* Использование идентифицированных математических моделей судна для обеспечения безопасности судовождения // Вестн. Мурманского гос. техн. ун-та. 2009. Т. 12, № 1. С. 10—12.

20. *Нгуен Х. Т., Власов С. М., Скобелева А. В.* Математическое моделирование и идентификация параметров модели надводного судна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 418—425. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-418-425.

21. *Ellis G.* Observers in Control Systems: A Practical Guide. Elsevier Science, 2002. P. 259.

22. *Chen J., Patton R. J.* Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. Boston, MA: Kluwer Acad. Publ., 1999. 354 p.

Сведения об авторах

Дарья Алексеевна Галкина — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: da.galkina@itmo.ru

Алексей Анатольевич Маргун — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; Институт проблем машиноведения РАН; ст. научный сотрудник; E-mail: aamargun@itmo.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 27.09.2023; принята к публикации 14.11.2023.

REFERENCES

1. Anuchin O.N., Emelyantsev G.I. *Integrirovannyye sistemy oriyentatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh ob"yektov* (Integrated Orientation and Navigation Systems for Marine Mobile Objects), St. Petersburg, 2003, 390 p. (in Russ.)
2. Liang Ts., Litvinenko Yu.A., Stepanov O.A. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, no. 2(26), pp. 29–42. (in Russ.)
3. Litvinenko Yu.A. *Optimizatsiya algoritmov inertsial'noy navigatsionnoy sistemy morskikh ob"yektov* (Optimization of Algorithms for the Inertial Navigation System of Marine Objects), Extended abstract of Candidate's thesis, St. Petersburg, 2005, 161 p. (in Russ.)
4. Kusic G.L. *2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2007, pp. 209–214.
5. Wu N.E., Thavamani S., Zhang Y., Blanke M. *Control Engineering Practice*, 2006, vol. 14, pp. 1337–1345.
6. Samy I., Postlethwaite I., Gu D.W. *Control Engineering Practice*, 2011, vol. 19, pp. 658–674.
7. Perera L.P. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 28(49), pp. 91–96.
8. Babaei M., Shi J., Abdelwahed S. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 9430–9441.
9. Roumeliotis S.I., Sukhatme G., Bekey G.A. *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1998, vol. 3, pp. 1383–1388.
10. Khalastchi E., Kalech M., Rokach L. *Proceedings of the 2014 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2014, pp. 941–948.
11. Kolesnik N.S., Margun A.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, no. 3(22), pp. 492–500. (in Russ.)
12. Lukomsky Yu.A., Peshekhonov V.G., Skhorokhodov D.A. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem sudov* (Navigation and Vessel Traffic Control), St. Petersburg, 2002, 360 p. (in Russ.)
13. Norrbin N.H. *On the Design and Analysis of the Zig-Zag Test on Base of Quasi Linear Frequency Response*, SSPA Report No. B104-3, 10th ITTC, London, 1963, pp. 355–374.
14. Tzeng C., Chen J. *Journal of Marine Science and Technology*, 1999, no. 2(7), pp. 79–88.
15. Do K.D., Pan J. *Control of Ships and Underwater Vehicles*, London, Springer, 2009, 418 p.
16. Semenov-Tyan-Shansky V.V., Blagoveshchensky S.N., Kholodilin A.N. *Kachka korablya* (The Rolling of the Ship), Leningrad, 1969. (in Russ.)
17. Krylov A.N. *Izbrannyye trudy* (Selected Works), Leningrad, 1958, 804 p. (in Russ.)
18. Abkowitz M.A. *Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Manoeuvrability*, Tech. Rep. Hy-5. Hydro and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark, 1964.
19. Yudin Yu.I., Stepakhno A.G., Gololobov A.N. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 1(12), pp. 10–12. (in Russ.)
20. Nguyen H.T., Vlasov S.M., Skobeleva A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, no. 3(21), pp. 418–425, DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-418-425. (in Russ.)
21. Ellis G. *Observers in Control Systems: A Practical Guide*, Elsevier Science, 2002, 259 p.
22. Chen J., Patton R.J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA, 1999, 354 p.

Data on authors

Daria A. Galkina — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: da.galkina@itmo.ru

Alexey A. Margun — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS; Senior Researcher; E-mail: aamargun@itmo.ru

Received 11.09.2023; approved after reviewing 27.09.2023; accepted for publication 14.11.2023.