



УДК 681.5, 531/534, 629.5.015

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ СУДНА ПО УГЛУ КРЕНА НА СИММЕТРИЧНЫХ ДВИЖЕНИЯХ

А.С. Алышев^a, Д.В. Ромаев^b, В.Г. Мельников^a, А.М. Титов^{c,b}, А.Е. Коваленко^{c,b}^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b АО «Навис», Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация^c Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

Адрес для переписки: aalyshev@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.12.18, принята к печати 14.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-347-358

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Алышев А.С., Ромаев Д.В., Мельников В.Г., Титов А.М., Коваленко А.Е. Идентификация параметров модели судна по углу крена на симметричных движениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 347–358. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-347-358

Аннотация

Разработан метод идентификации параметров модели судна с использованием симметричных движений по углу крена. Предметом исследования являются методы повышения точности идентификации параметров математических моделей корпуса судна и раскачивающего устройства, с применением судового канатного инклинометра. Используются малые симметричные реверсивные разгонно-тормозные программные движения по углу крена, при этом модель судна закреплена в опытовом бассейне и движение по другим степеням свободы исключено. Для создания программных движений использован установленный на судне раскачиватель в виде электродвигателя с маховиком. Для достижения высокой точности симметрии программного движения разработан гибридный адаптивный регулятор, составленный из последовательного компенсатора и сигнального регулятора, параметры которых настраиваются с учетом ограничения на свои максимальные значения. Идентификация разработанным методом осуществляется в двух экспериментах. В основном эксперименте осуществляются программные движения модели по углу крена, а в дополнительном – программные движения маховика по углу поворота маховика. Программная траектория движения маховика получена по итогам основного эксперимента. Приведены результаты отработки гармонического колебания системой управления. Рассмотрены принцип работы канатного инклинометра и варианты его конструкции. Приведены формулы, позволяющие определить позицию судна с системой динамического позиционирования в случае измерения углов в составе канатного инклинометра при помощи потенциометров или акселерометров. Результаты могут быть полезны при проведении модельных испытаний или для натурных судов с системами динамического позиционирования.

Ключевые слова

параметрическая идентификация, симметричные программные движения, маховичный раскачиватель, адаптивное управление, последовательный компенсатор, сигнальный регулятор, модель судна, система динамического позиционирования, судовый канатный инклинометр, акселерометр

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ №16-08-00997. Алышев А.С. выражает благодарность сотрудникам АО Навис, особенно А.Н. Мирошникову, А.Ю. Логинову, Е.Б. Амбросовской, С.В. Гусеву, А.В. Крылову.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF SHIP MODEL BY SYMMETRIC MOTIONS AROUND ROLL ANGLE

A.S. Alyshev^a, D.V. Romaev^b, V.G. Melnikov^a, A.M. Titov^{c,b}, A.E. Kovalenko^{c,b}^aITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^bNavis Engineering, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation^cSaint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

Corresponding author: aalyshev@yandex.ru

Article info

Received 24.12.18, accepted 14.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-347-358

Article in Russian

For citation: Alyshev A.S., Romaev D.V., Melnikov V.G., Titov A.M., Kovalenko A.E. Parametric identification of ship model by symmetric

motions around roll angle. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 347–358 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-347-358

Abstract

The paper presents a method of identifying the parameters of the ship model using symmetric motions. The subject of research is the improvement of the parameter identification accuracy under the condition of complete uncertainty of mathematical models of the ship hull and reaction wheel device, as well as the development of a new position reference sensor for ship models in the form of a tautwire inclinometer. Small symmetric reversing accelerating-decelerating program motions about roll angle were used, while the model of the vessel was fixed in the test basin and the movement in other degrees of freedom was excluded. To create the programmed motions, an electric motor with a flywheel mounted on the vessel was used. To achieve high accuracy of a programmed motion symmetry, a hybrid adaptive controller was developed consisting of a consecutive compensator and a sliding controller, and their parameters are adjusted taking into account the restriction on their maximum values. Identification by the developed approach involves carrying out two experiments. During the main experiment, the program motions of the model occur about the roll angle, while the additional experiment involves programmed motions of the flywheel around the flywheel rotation angle. The program trajectory of the flywheel was obtained according to the results of the main experiment. Illustrative results are given showing the essence of the proposed method and the results of the control system with harmonic oscillation as a reference trajectory. The operating principle of the cable inclinometer and variants of its design are considered. Calculation formulas are given determining the position of a vessel with a dynamic positioning system in the case of measuring angles in the cable inclinometer using potentiometers or accelerometers. The results can be useful when carrying out model tests or for full-scale vessels with dynamic positioning systems.

Keywords

parametric identification, symmetric program motions, flywheel oscillator, adaptive control, consecutive compensator, sliding mode control, ship model, dynamic position, tautwire reference sensor, accelerometer

Acknowledgements

This work was supported by the RFBR grant No.16-08-00997. A.S. Alyshev expresses his gratitude to the employees of JSC Navis Engineering, especially to A.N. Miroshnikov, A.Y. Loginov, E.B. Ambrosovskaaya, S.V. Gusev and A.V. Krylov.

Введение

Рассматривается энергетический метод идентификации, развиваемый в работах [1–4]. В отличие от предыдущих работ здесь рассматриваются управляемые колебания модели судна по углу крена на реверсивно-симметричных участках движения, параметры модели раскачивающего устройства определяются в дополнительном эксперименте по итогам основного. Представленный в [2] стенд модифицирован следующим образом. Модель судна закреплена таким образом, что может совершать колебания по углу крена при помощи управляемого маховика за счет изменения его скорости вращения. В [5] рассматриваются маховики судов, вращающиеся с большой постоянной скоростью, при этом для компенсации крена выполняется контроль угла прецессии опоры двигателя с маховиком. Принцип их работы подобен принципам функционирования двигателей маховиков спутников.

Метод и математическая модель

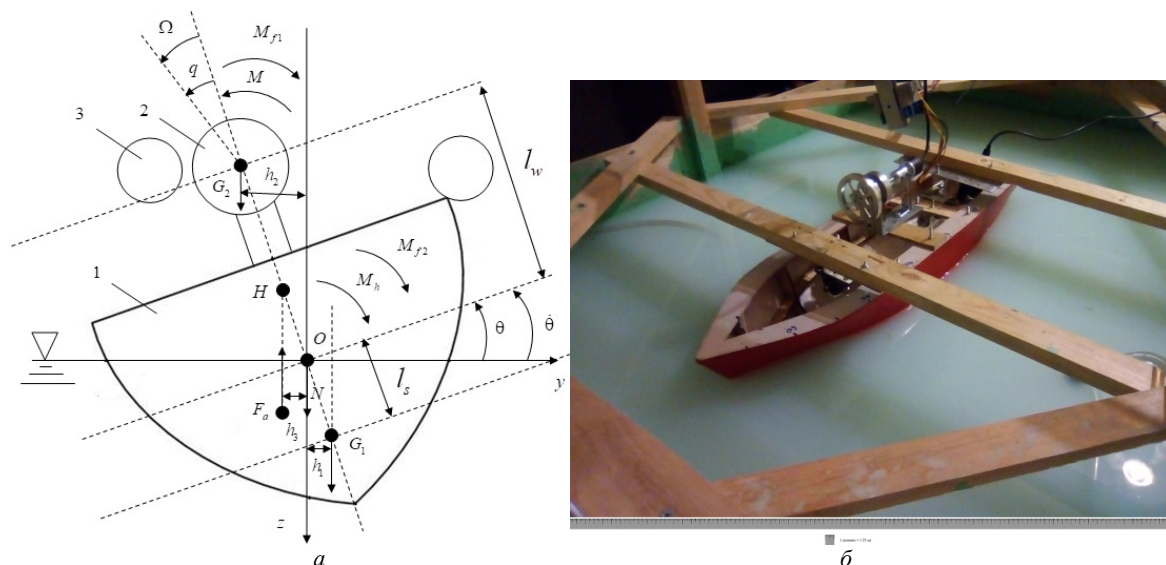


Рис. 1. Крен судна (а) и стенд (б)

Рассмотрим механическую систему, представленную на рис. 1. Модель судна I закреплена в опытном бассейне вдоль своей продольной оси через подшипниковые опоры. На судне закреплён электродвигатель с маховиком 2, ось вращения которого параллельна продольной оси судна. Ось Oy

лежит в плоскости ватерлинии; θ – угол крена; q и Ω – угол поворота и угловая скорость маховика; $G_1 = m_1 g$ и $G_2 = m_2 g$ – силы тяжести элементов 1 и 2 с плечами h_1 и h_2 ; g – ускорение свободного падения; F_a – выталкивающая сила жидкости на погруженный объем V корпуса судна и плечо этой силы h_3 ; M_{f1} и M_{f2} – моменты трения в подшипниках электродвигателя и корпуса судна, M_h и M – гидродинамический момент и электромагнитный момент электродвигателя; l_s и l_w – расстояния от оси вращения до центра масс первого и второго элементов; m_1 и m_2 – массы первого и второго элементов. Моменты сил тяжести элементов $G_1 l_s > G_2 l_w$ (модель устойчива при колебаниях в воздухе и в воде на небольших углах крена). Для предотвращения опрокидывания модели используются ограничители β . Углы θ и q измеряются энкодерами, а сила тока I – датчиками Холла. Математическая модель системы в воздухе и воде для малых углов θ имеет вид:

$$\begin{aligned} a_{44} \ddot{\theta} + J \dot{\Omega} &= -M_{ba} - f_{c4} (F_{n1}) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - f_{441} (F_{n1}) \dot{\theta} - f_{442} (F_{n1}) \dot{\theta} |\dot{\theta}|, \\ a'_{44} \ddot{\theta} + J \dot{\Omega} &= -M_{bw} - f'_{c4} (F_{n2}) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - (f'_{441} (F_{n2}) + b_{441} (S)) \dot{\theta} - (f'_{442} (F_{n2}) + b_{442} (S)) \dot{\theta} |\dot{\theta}| \\ M_{ba} &= G_1 h_1 - G_2 h_2 = (G_1 l_s - G_2 l_w) \sin \theta = c_{44} \sin \theta, \\ M_{bw} &= M_{ba} + F_a h_3 = (G_1 l_s - G_2 l_w + F_a (h - z_0)) \sin \theta = c'_{44} \sin \theta, \\ J \ddot{q} + J \ddot{\theta} &= k_t I - f_c \operatorname{sgn}(\Omega) - f_v \Omega, \quad I = \frac{1}{T_c p + 1} u, \quad \dot{q} = \Omega, \quad a_{44} = J_{yy} + m_1 l_s^2 + J + m_2 l_w^2, \quad a'_{44} = a_{44} + \lambda_{44}, \\ h_3 &= (h - z_0) \sin \theta, \end{aligned}$$

где J_{yy} – момент инерции элемента 1 относительно его центра масс; λ_{44} – присоединенный момент инерции масс жидкости; J – момент инерции элемента 2 относительно его центра масс; z_0 – длина отрезка от точки O до центра масс системы «элемент 1 + элемент 2» (лежит на отрезке, соединяющем точку O и точку приложения силы G_1); h – метacentрическая высота (длина отрезка, соединяющего точки H и z_0); u – управляющий сигнал напряжения электродвигателя; k_t – коэффициент передачи электродвигателя по моменту; F_{ni} – результирующая сила давления на подшипники; $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; M_{ba} и M_{bw} – восстанавливающие моменты корпуса в воздухе и в воде; S – площадь смоченной поверхности корпуса судна; f_{c4} , f_{44i} и f'_{44i} – постоянные параметры моментов трения в подшипниках опоры корпуса судна; b_{44i} – параметры момента гидродинамического сопротивления, которые приняты постоянными ввиду симметричности корпуса судна относительно диаметральной плоскости; параметры момента трения маховика

$$f_c = \begin{cases} f_{c+}(q) \approx f_{c+}^0 & \text{и } f_v = \begin{cases} f_{v+}(q) \approx f_{v+}^0 & \text{при } \Omega \geq 0 \\ f_{v-}(q) \approx f_{v-}^0 & \text{при } \Omega < 0 \end{cases} \end{cases};$$

T_c – постоянная времени замкнутого контура тока. Значения присоединенного момента инерции (ПМИ) λ_{44} зависят от частоты колебаний судна.

Рассмотрим два симметричных этапа неравномерного вращения тела на интервалах угловых скоростей $[\dot{\theta}(t_1), \dot{\theta}(t_2)]$ и $[\dot{\theta}(t_3), \dot{\theta}(t_4)] = [\dot{\theta}(t_2), \dot{\theta}(t_1)]$ с отрицательным и равным по модулю положительным угловым ускорением. Этап с положительным угловым ускорением имеет временной интервал $[t_1, t_2]$, а отрицательным – $[t_3, t_4]$. Запишем уравнения энергии для таких движений:

$$T(t_1) - T(t_2) = A_1 + B_1 + E_{441} + D_{441} + C_1, \quad (1)$$

$$T(t_4) - T(t_3) = A_2 + B_2 + E_{442} + D_{442} + C_2,$$

где A_1 и A_2 , B_1 и B_2 , E_{441} и E_{442} , D_{441} и D_{442} , C_1 и C_2 – работы, создаваемые моментом двигателя, трением в подшипниках электродвигателя, восстанавливающим моментом, гидродинамическим моментом и моментом трения в подшипниках модели судна соответственно.

В каждый момент времени удвоенная кинетическая энергия системы:

$$2T(t_i) = a_{44} \dot{\theta}^2(t_i) + 2J \dot{\theta}(t_i) \Omega(t_i) + J \Omega^2(t_i). \quad (2)$$

Составим разность уравнений энергии (1), подставим в нее уравнения вида (2). Тогда с учетом симметрии интервалов движения при

$$D_{441} + C_1 = D_{442} + C_2 = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (M_h + M_{f_2}) \dot{\theta} dt = - \int_{t_i}^{t_{i+1}} (f'_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + (f'_{441} + b_{441}) \dot{\theta} + (f'_{442} + b_{442}) \dot{\theta} |\dot{\theta}|) \dot{\theta} dt$$

получим оценку инерционного параметра:

$$\hat{a}_{44} = \frac{2(A_1 + B_1 - A_2 - B_2) + 2\hat{c}_{44}\Delta_{a1} - \chi_1}{\Delta_{s1}} \quad (3)$$

при

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{t_1}^{t_2} \hat{M} \hat{\Omega} dt, \quad A_2 = \int_{t_3}^{t_4} \hat{M} \hat{\Omega} dt, \\ B_1 &= \int_{t_1}^{t_2} \hat{M}_{f1} \hat{\Omega} dt = - \int_{t_1}^{t_2} (\hat{f}_c \operatorname{sgn}(\hat{\Omega}) + \hat{f}_v \hat{\Omega}) \hat{\Omega} dt, \quad B_2 = \int_{t_3}^{t_4} \hat{M}_{f1} \hat{\Omega} dt = - \int_{t_3}^{t_4} (\hat{f}_c \operatorname{sgn}(\hat{\Omega}) + \hat{f}_v \hat{\Omega}) \hat{\Omega} dt, \\ \Delta_{a1} &= \cos \theta_2 + \cos \theta_3 - \cos \theta_1 - \cos \theta_4, \quad \Delta_{a2} = \cos \theta_5 + \cos \theta_6 - \cos \theta_1 - \cos \theta_4, \\ \Delta_{s1} &= \hat{\theta}_2^2 + \hat{\theta}_3^2 - \hat{\theta}_1^2 - \hat{\theta}_4^2, \quad \Delta_{s2} = \hat{\theta}_5^2 + \hat{\theta}_6^2 - \hat{\theta}_1^2 - \hat{\theta}_4^2, \\ \chi_1 &= \hat{J} \left(\hat{\Omega}^2(t_2) + \hat{\Omega}^2(t_3) - \hat{\Omega}^2(t_1) - \hat{\Omega}^2(t_4) + 2(\hat{\theta}(t_2)\hat{\Omega}(t_2) + \hat{\theta}(t_3)\hat{\Omega}(t_3) - \hat{\theta}(t_1)\hat{\Omega}(t_1) - \hat{\theta}(t_4)\hat{\Omega}(t_4)) \right). \end{aligned}$$

Момент двигателя считаем пропорциональным току электродвигателя $\hat{M} = \hat{k}_i I$. Коэффициент передачи \hat{k}_i считается известным или полученным экспериментально с отдельным электродвигателем при помощи тела с эталонным моментом инерции.

Оценку $\hat{c}_{44} = (m_1 \hat{l}_s - m_2 l_w) g$ получим из рассмотрения дополнительной пары симметричных интервалов $\left[\theta(t_1), \theta\left(t_5 = \frac{t_1 + t_2}{2}\right) \right]$ и $\left[\theta\left(t_6 = \frac{t_3 + t_4}{2}\right), \theta(t_4) \right]$, где этап с положительным угловым ускорением имеет временной интервал $[t_1, t_5]$, а отрицательным – $[t_6, t_4]$. Для дополнительной пары симметричных интервалов составим разность двух уравнений энергии с учетом симметрии движений:

$$\hat{c}_{44} = \frac{(A_3 + B_3 - A_4 - B_4)\Delta_{s1} - (A_1 + B_1 - A_2 - B_2)\Delta_{s2} - 0,5(\Delta_{s1}\chi_2 - \Delta_{s2}\chi_1)}{\Delta_{s2}\Delta_{a1} - \Delta_{s1}\Delta_{a2}}, \quad (4)$$

$$\chi_2 = \hat{J} \left(\hat{\Omega}^2(t_5) + \hat{\Omega}^2(t_6) - \hat{\Omega}^2(t_1) - \hat{\Omega}^2(t_4) + 2(\hat{\theta}(t_5)\hat{\Omega}(t_5) + \hat{\theta}(t_6)\hat{\Omega}(t_6) - \hat{\theta}(t_1)\hat{\Omega}(t_1) - \hat{\theta}(t_4)\hat{\Omega}(t_4)) \right). \quad \text{Далее}$$

зададим программные движения на той же траектории в воде и для этих симметричных интервалов получим оценку ПМИ:

$$\hat{\lambda}_{44} = \frac{2(A'_1 + B'_1 - A'_2 - B'_2) + 2\hat{c}'_{44}\Delta_{a1} - \chi'_1}{\Delta_{s1}} - \hat{a}_{44}, \quad (5)$$

а также параметра $\hat{c}'_{44} = (m_1 \hat{l}_s - m_2 l_w + \rho V(\hat{h} - \hat{z}_0)) g$. Оценку положения центра масс \hat{z}_0 получим по формуле

$$\hat{z}_0 = \frac{G_1 \hat{l}_s - G_2 l_w}{G_1 + G_2}, \quad \text{тогда метацентрическую высоту } \hat{h} \text{ оценим по формуле } \hat{h} = \frac{\hat{c}'_{44} - \hat{c}_{44}}{\rho V g} + \hat{z}_0. \quad \text{При ма-}$$

лых силы реакции опоры $N \approx 0$ и изменения объема V и условия статического равновесия системы можно принять $\rho V g = G_1 + G_2$, а также получить $\hat{c}'_{44} = \rho V g \hat{h}$.

Для расчета по формулам (3)–(5) требуется определение параметров момента трения в двигателе и момента инерции J . Определим \hat{B}_i и \hat{J} с помощью дополнительного эксперимента, не вводя дополнительные уравнения для задания модели момента трения маховика и определения ее коэффициентов при различных симметричных парах интервалов. Суть состоит в том, что после опытов с корпусом судна в воздухе и в воде получены кривые угла поворота маховика $q(t) \in [0, q(t_m)]$. Модель судна фиксируется по углу крена. Далее функцию $q(t)$ дополним сигналом $q'(t)$, аналогичным сигналу $q(t)$ в обратном направлении (симметричные однонаправленные движения). Полученный сигнал является программной траекторией для следящей системы по углу поворота маховика.

Выполним программное движение по полученной траектории и рассмотрим уравнения энергии для двух частей прямого движения на интервале $q(t) \in [q(t_1), q(t_2)] \cup [q(t_3), q(t_4)]$:

$$J(\Omega^2(t_2) - \Omega^2(t_1)) = 2(A_5 + B_1), \quad J(\Omega^2(t_4) - \Omega^2(t_3)) = 2(A_6 + B_2),$$

и для двух частей обратного симметричного движения на интервалах $q(t) \in [2q(t_m) - q(t_4), 2q(t_m) - q(t_3)] \cup [2q(t_m) - q(t_2), 2q(t_m) - q(t_1)]$:

$$J(\Omega^2(t_8) - \Omega^2(t_7)) = 2(A_7 + B_7), \quad J(\Omega^2(t_{10}) - \Omega^2(t_9)) = 2(A_8 + B_8).$$

В случае малой ошибки слежения при равенстве диссипативных функций $B_1 = B_8$, $B_2 = B_7$ и равенств угловых скоростей $\Omega^2(t_1) = \Omega^2(t_{10})$, $\Omega^2(t_2) = \Omega^2(t_9)$, $\Omega^2(t_3) = \Omega^2(t_8)$ и $\Omega^2(t_4) = \Omega^2(t_7)$ получим требуемые оценки:

$$\hat{B}_1 - \hat{B}_2 = 0,5(A_6 + A_7 - A_5 - A_8), \quad \hat{J} = \frac{A_5 - A_8 + A_6 - A_7}{\hat{\Omega}^2(t_2) - \hat{\Omega}^2(t_1) + \hat{\Omega}^2(t_4) - \hat{\Omega}^2(t_3)}. \quad (6)$$

При расчетах по формулам (6) предполагается, что электродвигатель корректирует колебания по углу крена таким образом, что на выбранных интервалах его угловая скорость состоит из участков неравномерного движения и выполняется условие $\hat{\Omega}^2(t_2) - \hat{\Omega}^2(t_1) + \hat{\Omega}^2(t_4) - \hat{\Omega}^2(t_3) \neq 0$.

Аналогично можно получить выражения для $\hat{B}'_1 - \hat{B}'_2$, $\hat{B}_3 - \hat{B}_4$, $\hat{B}'_3 - \hat{B}'_4$. Стоит отметить, что сведение к нулю не только ошибки слежения гарантирует симметричность двух участков движения, но и разности углов поворота (ошибки симметричности) непосредственно между двумя интервалами движения. При наличии помех измерений графики угловых скоростей необходимо пропустить через фильтр, например, медианный.

Если испытания стендовые, целесообразно использовать конструкцию с прямым соединением ротора двигателя и корпуса судна, что позволит точнее осуществить идентификацию без реверса модели на первом полуколебании. Конструкция стенда выбрана такой, чтобы в дальнейшем можно было использовать маховичный раскачиватель для опытов со свободно плавающей моделью судна. В статье рассматриваются установившиеся колебания, незначительную коррекцию которых при малом расходе энергии обеспечивает электродвигатель. При частых реверсах модели судна частицы жидкости постоянно перемешиваются, поэтому значения коэффициентов \hat{a}'_{44} несколько отличны от полученных на первом колебании.

Далее рассмотрим алгоритм управления, позволяющий задавать требуемую программную гармоническую траекторию модели судна. Проведя серию экспериментов с различными программными траекториями, возможно определить зависимость изменения ПМИ от частоты колебаний и осадки судна при изменении уровня жидкости в опытном бассейне.

Пример работы регулятора

Для рассматриваемой системы составлен гибридный адаптивный регулятор, включающий в себя последовательный компенсатор $u_1(t)$ [6] с дополнительным внесением коэффициента b_k , сигнальный регулятор $u_2(t)$ [7], интегральную составляющую с коэффициентом k_{int} и антивиндап-коррекцию (anti-windup, AW) с коэффициентом k_{aw} :

$$u_1(t) = \dot{k}_1(t)\xi(t) + k_1(t)\dot{\xi}(t) + b_k k_1(t)\xi(t) + \frac{k_{int}}{p}(e_1(t) - k_{aw}u_{aw}(t)), \quad (7)$$

$$\dot{\xi}(t) = \sigma_0 k_1^2(t)(e_1(t) - \xi(t)),$$

$$u_2(t) = k_2(t)\sqrt{|e_1(t) + \xi(t)|} \operatorname{sgn}(e_1(t) + \xi(t)),$$

$$e_1(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t), \quad u_{aw}(t) = u_1(t) + u_2(t) + u(t),$$

$$u(t) = \begin{cases} u_{\min} & u_1(t) + u_2(t) < u_{\min} \\ u_1(t) + u_2(t) & \text{при } u_{\min} \leq u_1(t) + u_2(t) \leq u_{\max} \\ u_{\max} & u_1(t) + u_2(t) > u_{\max} \end{cases}.$$

где u_{\min} и u_{\max} – ограничения на сигнал управления; $e(t)$ – ошибка слежения; $\xi(t)$ – переменная (оценка входа системы, т.е. $\hat{e}_1(t)$); $\theta_{ref}(t)$ – сигнал программной траектории по углу крена.

На основе [1, 6, 7] сформируем модифицированный алгоритм настройки подстраиваемых параметров:

$$\dot{k}_1(t) = \begin{cases} -\gamma_1(k_1(t) - k_{01}) \\ 0 \end{cases} \text{ и } \dot{k}_2(t) = \begin{cases} -\gamma_2(k_2(t) - k_{02}) \\ 0 \end{cases} \text{ при } \begin{cases} |W_f(p)e_1(t)| > \delta_0 \\ |W_f(p)e_1(t)| \leq \delta_0 \end{cases},$$

где $k_{01} > 0$ и $k_{02} > 0$ – задаваемые максимальные значения настраиваемых параметров $k_1(t)$ и $k_2(t)$; $\gamma_1 > 0$ и $\gamma_2 > 0$ – параметры; $W_f(p) = (T_f p + 1)^{-1}$ – фильтр с постоянной времени T_f ; δ_0 – задаваемая малая ошибка слежения. Вторая составляющая закона управления может сокращать время переходного процесса, установившееся значение $k_1(t)$ и повышать точность слежения.

Для дополнительного опыта, предполагая, что параметры электродвигателя не изменяются, используем следующий регулятор:

$$u_3(t) = \left(K_p + K_D \frac{p}{T_D p + 1} + \frac{K_I}{p} \right) e_2(t), \quad e_2(t) = q_{ref}(t) - q(t).$$

где K_p , K_D , K_I и T_D – коэффициенты регулятора и постоянная времени дифференцирующего наблюдателя соответственно; $q_{ref}(t)$ – сигнал программной траектории по углу поворота маховика.

Обеспечим выполнение подобия натурального судна по числу Фруда и Струхала $\frac{\dot{\theta}^*}{\theta} = \sqrt{\frac{L_{WL}}{L_{WL}^*}}$ и

$$\frac{T^*}{T} = \sqrt{\frac{L_{WL}^*}{L_{WL}}},$$

где L_{WL} – длина модели судна по ватерлинии; T – период колебаний модели судна, звездочкой обозначены величины для полноразмерного судна.

Рассмотрим алгоритм выбора начальных значения параметров регулятора для идентификации модели, погруженной в воду. Математическую модель обобщенного момента трения корпуса судна представим в виде $M_h + M_{f2} \approx b'_{440} \dot{\theta}$ с коэффициентом затухания b'_{440} .

Рассмотрим линеаризованную систему при неподвижном маховике при $\sin \theta \approx \theta$, $\Omega = 0$. В этом случае передаточная функция системы (далее t опущено) имеет вид: $\theta = \frac{1}{T_c p + 1} \frac{k_t}{a'_{440} p + b'_{440} + \frac{1}{p} c'_{440}} \frac{1}{p} e_1$.

Настроим контур по углу поворота на модульный оптимум при малой постоянной времени $T_\mu \approx T_c$ и коэффициенте $n \approx 2$:

$$W_c(p) \frac{1}{T p + 1} \frac{k_t}{a'_{440} p^2 + b'_{440} p + c'_{440}} = \frac{1}{n T_\mu p (T_\mu p + 1)},$$

тогда закон управления u_c имеет вид

$$u_c = \frac{a'_{440} p^2 + b'_{440} p + c'_{440}}{n T_\mu k_t p} e_1 = \left(\frac{a'_{440}}{n T_\mu k_t} p + \frac{b'_{440}}{n T_\mu k_t} + \frac{c'_{440}}{n T_\mu k_t} \frac{1}{p} \right) e_1. \quad (8)$$

Далее рассмотрим уравнения (7) при $\dot{k}_1 = 0$, $k_{aw} = 0$, $\sigma_0 k_1^2 = T_\mu^{-1}$, $k_1 = k_{01}$:

$$u_1 = (k_1 p + b_k k_1) \xi + \frac{k_{mr}}{p} e_1 \approx \left(k_1 p + b_k k_1 + \frac{k_{mr}}{p} \right) e_1 \text{ при } \xi = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_0 k_1^2} p + 1} e_1 \approx e_1. \quad (9)$$

Приравняв коэффициенты при подобных членах в выражениях (8) и (9), получим начальные значения параметров регулятора (7):

$$k_{01} = \frac{a'_{440}}{n T_\mu k_t}, \quad b_k = \frac{b'_{440}}{n T_\mu k_t k_{01}} = \frac{b'_{440}}{a'_{440}}, \quad k_{mr} = \frac{c'_{440}}{n T_\mu k_t}, \quad \sigma_0 = \frac{1}{T_\mu k_{01}^2}.$$

Для определения a'_{440} и b'_{440} можно воспользоваться методом свободных затухающих колебаний. Поскольку частным решением уравнения затухающих колебаний является $\theta = A e^{-\beta t} \cos(\omega_1 t - \theta_0)$ (θ_0 – фаза колебаний), инерционный параметр может быть оценен по формуле $a'_{440} = \frac{c'_{440}}{\omega_0^2}$, а коэффициент

затухания получен по формуле $b'_{440} = 2\xi_s \frac{c'_{440}}{\omega_0}$, где ω_0 – частота собственных незатухающих колебаний; ξ_s – относительный коэффициент затухания. При вязком трении колебания будут затухать по экспоненциальному закону: $\xi_s \omega_0 = \frac{1}{\tau} = \beta_s$, где τ – время, в течение которого амплитуда колебаний убывает в e раз, а ω_0 определяется через круговую частоту затухающих колебаний $\omega_0 = \sqrt{\omega_1^2 + \frac{1}{\tau^2}}$, $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_s}$ т.е. $a'_{440} = \frac{\tau^2 T_s^2 c'_{440}}{4\pi^2 \tau^2 + T_s^2}$, $b'_{440} = 2 \frac{\tau T_s^2 c'_{440}}{4\pi^2 \tau^2 + T_s^2} = \frac{2}{\tau} a'_{440}$. Коэффициент c'_{440} можно оценить путем добавления эталонного груза. При известных границах интервальных параметров a'_{440} и b'_{440} желательно задавать начальное значение $k_1(0) = \frac{a'_{440}}{nT_\mu k_t}$, при $k_{01} = 1,5k_1(0)$.

При свободном плавании модели судна начальные значения параметров регулятора могут быть получены путем приближенной замены корпуса судна эллипсоидом, для которого известны эталонные значения параметров. Далее считаем параметры корпуса судна заранее неизвестными. Для эксперимента использован электродвигатель с параметром $k_t = 51 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$. Параметры регулятора выберем следующими: $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,1$, $\sigma_0 = 0,008$, $\delta_0 = 0,02$, $k_{01} = 15$, $k_{02} = 0,8$, $T_f = 0,14$, $k_{in} = 0,3$, $b_k = 1$, $k_{aw} = 0$, $k_1(0) = 0$, $k_2(0) = 0$. Программная траектория имеет вид $\dot{\theta}_{ref}(t) = A \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$ при $T^* = 14,2$ с, $L_{WL}^* = 150$ м, $A^* = A = 0,2$ рад, $T = 0,95$ с. Для дополнительного эксперимента выбраны параметры регулятора: $K_p = 0,025$, $K_D = 0,035$, $k_{in} = 0,005$, $T_D = 0,05$. На рис. 2 и 3 представлены результаты настройки параметров регулятора основного эксперимента, а на рис. 4 – угол поворота маховика дополнительного эксперимента.

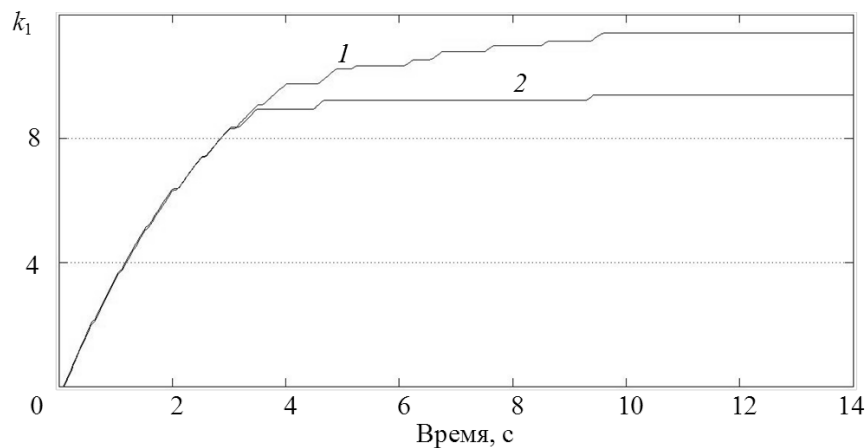


Рис. 2. Параметр k_1 (1 – в воздухе, 2 – в воде)

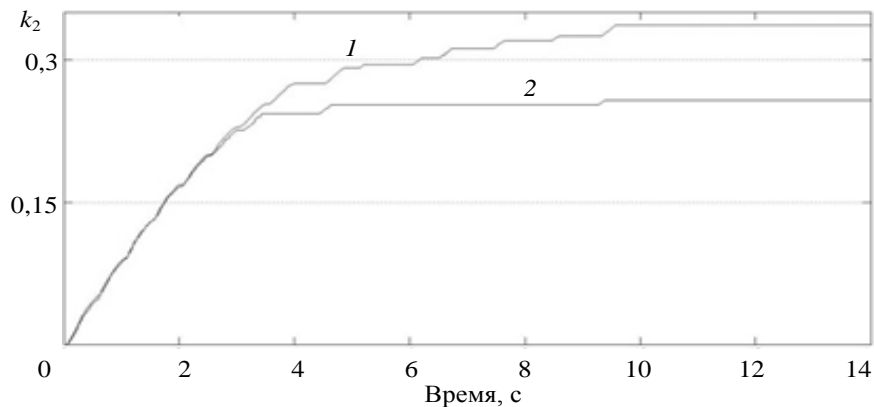


Рис. 3. Параметр k_2 (1 – в воздухе, 2 – в воде)

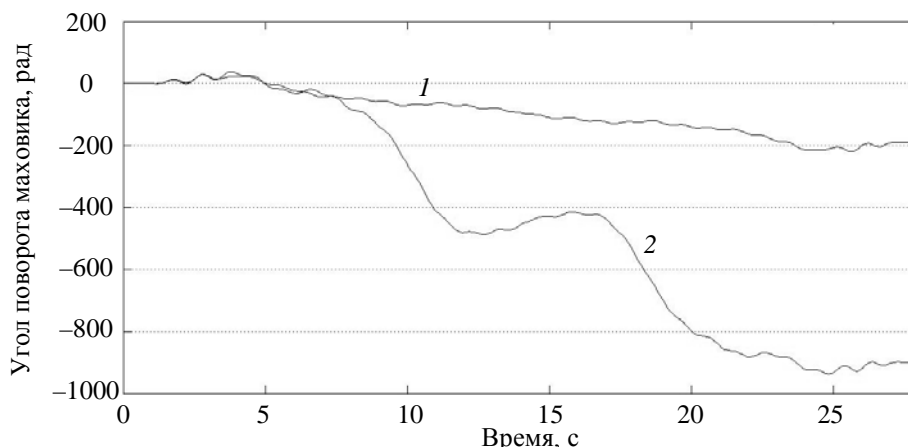


Рис. 4. Угол поворота маховика на дополнительном эксперименте (1 – в воздухе, 2 – в воде)

Погрешность метода обусловлена главным образом двумя ошибками слежения по углу поворота маховика и модели судна. Дополнительную погрешность вносят волны, возникающие в результате отражения от стенок малого бассейна. Система управления способна компенсировать такие неучтенные возмущения, в то же время для повышения точности идентификации рекомендуется применять разработанный метод в бассейнах больших размеров.

Использование судового канатного инклинометра в задаче идентификации

Рассмотрим датчики местоположения судов, которые оборудованы системами динамического позиционирования (ДП). В качестве основных датчиков систем ДП используются: гирокомпас для измерения угла курса, Motion Reference Unit (MRU) и (или) Vertical Reference System (VRS) – для измерения параметров качки, а также глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) – для определения местоположения. Помимо ГНСС для обеспечения высокой точности позиционирования судна в случае отказа основного датчика используется одновременно несколько систем ориентации, работающих на разных физических принципах.

Основными типами являются: спутниковые (дифференциальная ГНСС, DGPS), лазерно-оптические (Fanbeam, CyScan, SpotTrack), радиоволновые (Artemis, Radius, Radascan), акустические, электромеханические (TautWire). Аналогом ГНСС для моделей судов является система технического зрения [8, 9]. Одним из первых датчиков определения местоположения судна для системы ДП является электромеханический датчик TautWire [10, 11]. Принцип работы TautWire заключается в следующем: на морское дно через шлюпбалку за борт или буровую шахту судна при постоянной скорости с помощью лебедки с управляемым двигателем опускается подвешенный на тросе груз. После того как груз достигает дна, система управления лебедкой переходит в режим удержания заданной постоянной силы натяжения троса, обычно устанавливаемой на величину 50–60 % от веса груза и измеряемой тензодатчиками на стреле крана. Предполагается, что судно находится в заданной точке либо дрейфует вокруг нее с малой скоростью. На кардановом подвесе системы TautWire установлены датчики, измеряющие два угла отклонения троса (от/к борту и вдоль борта вперед–назад при помощи потенциометрических датчиков углов или акселерометров); а также измеряется длина вытравленного троса L_0 при помощи датчика углового положения ротора двигателя.

Точность данного датчика зависит от течения, волнового воздействия и веса троса. Поэтому система TautWire, как правило, не может обеспечить высокую точность, требуемую, к примеру, для ввода бура в скважину. В то же время она может быть весьма полезной в случае нестабильной работы дифференциальной ГНСС или гидроакустической навигационной системы с длинной базой, которые вместе с TautWire являются основными системами для определения местоположения судна в открытой воде. Также дифференциальные ГНСС и акустические системы трудно сделать полностью дублированными для обеспечения большего резервирования, так как при использовании резервированной дифференциальной ГНСС они обе могут быть одновременно под воздействием сцинтилляции. Кроме того, датчики дифференциальной ГНСС могут иметь аномалии, такие как тренд, скачок, залипание и запаздывание [12]. Система управления лебедкой и конструкция датчика должны также исключать скручивание, образование петель троса и повреждение угловой измерительной системы при касании груза о дно. В основном режиме она должна обладать достаточным быстродействием для компенсации качки судна. Конструкция датчика должна быть достаточно надежной для работы в различных погодных условиях и допускать непрерывную работу на протяжении недель. Задача поддержания натяжения троса имеет общие черты с задачей удержания положения подвешенного груза

на кране или натяжения в намоточных механизмах.

В ранних системах ДП простейший способ заключался в подвешивании противовеса через полиспаг. Основной недостаток такого способа связан с возникающим со стороны противовеса ускорением, влияющим на трос при качке судна. Самые распространенные современные системы используют управляемую лебедку, которая может иметь гидравлический или электрический привод, а также компенсирующее устройство. Компенсирующим устройством обычно является пневматический цилиндр, похожий на применяемый в системе натяжения водоотделяющей колонны на буровых судах или на гидропневмоцилиндр на дноуглубительных судах, когда необходимо поддерживать положение земснаряда на неровном дне или при качке судна [13, 14]. Внутри пневмоцилиндра TautWire встроены датчик положения поршня.

Форма троса датчика TauWire для малых глубин (до 50 м и с заявляемой производителем точностью в 1 см) оценивается при помощи дополнительных измерений углов отклонения троса у груза на дне. Для больших глубин (вплоть до 1 км) одним из возможных путей повышения точности является применение дополнительного оптоволоконного троса с датчиками деформации, сцепленного с основным тросом [15]. Для передачи постоянного момента могут использоваться порошок или фрикционные муфты [16] с электронным или пневматическим управлением при поддержании постоянной скорости вращения ведущей части муфты. Недостатками при этом являются сложность в обеспечении коррозионной устойчивости порошковых муфт, необходимость системы охлаждения, скорость скольжения таких муфт бывает ограничена, также требуется периодическая замена ферромагнитного порошка. В настоящее время не выпускаются датчики TautWire с муфтами скольжения.

На рис. 5 представлены показания TautWire и навигационной спутниковой системы (GPS). Видна типичная разница в определении позиции судна с использованием GPS и TautWire при движении по квадрату на небольшой глубине (не более 100 м). При увеличении глубины точность датчика TautWire значительно падает.

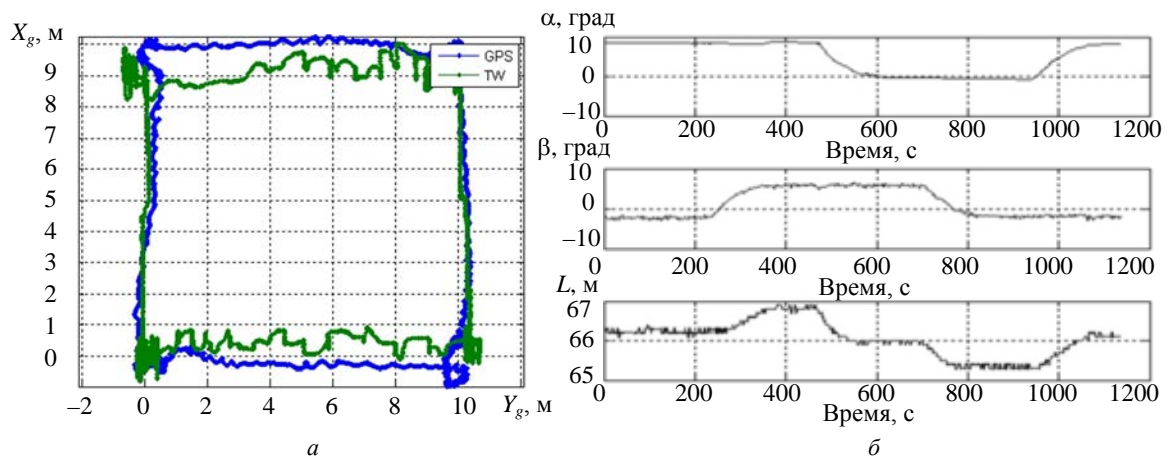


Рис. 5. Траектория движения (а) и данные TautWire (TW) (б) при определении положения судна NOORDHOEK PATHFINDER

Определить положение судна при помощи такого датчика позволят следующие формулы. Обозначим $L = l_0 + L_0$ как суммарную длину вытравленного троса, где l_0 длина «нулевого» подвеса груза. Измеряемые углы отклонения троса (рис. 6, б) могут включать в себя угол крена и угол дифферента, если датчик – потенциометр, который измеряет углы относительно стрелы крана.

В предположении, что поддерживается точное натяжение троса, координаты груза (X_w , Y_w) относительно центра тяжести (ЦТ) судна при использовании потенциометров определяются по формулам:

$$X_w = X_\psi - \frac{L \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta + 1}} \operatorname{sgn}(Y_0),$$

$$Y_w = Y_0 + \left(\frac{L \cdot \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta + 1}} + h_{TW} \sin \theta + l_{TW} \cos \theta \right) \operatorname{sgn}(Y_0),$$

$$\alpha_0 = \alpha + \theta \operatorname{sgn}(Y_0),$$

$$\beta_0 = \beta - \psi \operatorname{sgn}(Y_0),$$

$$X_\psi = X_0 \cos \theta - Z_0 \sin \theta,$$

$$Y_0 = Y_0 \cos \theta + Z_0 \sin \theta,$$

где X_w, Y_w – координаты точки установки датчика на судне с учетом качки (относительно ЦТ судна, лежащего в точке пересечения плоскости невозмущенной поверхностью воды и мидель-шпангоута); α, β и α_0, β_0 – углы отклонения троса без учета и с учетом качки; h_{TW} и l_{TW} – вертикальная и горизонтальная проекция расстояния от точки установки датчика до точки подвеса троса; ψ – угол дифферента судна; X_0, Y_0 и Z_0 – расстояния от ЦТ судна до точки установки датчика без учета качки. Координаты ЦТ (X_g, Y_g) судна в земной системе координат (ЗСК), относительно груза с учетом угла курса судна φ , определяются следующим образом

$$X_g = -(X_w \cos \varphi - Y_w \sin \varphi),$$

$$Y_g = -(X_w \sin \varphi + Y_w \cos \varphi).$$

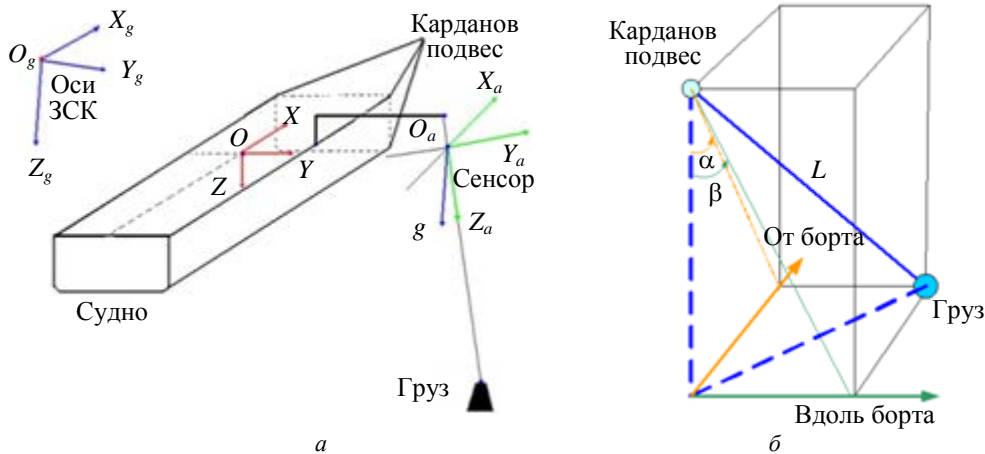


Рис. 6. Система координат (а) и углы отклонения троса (б)

В случае использования двухосевого акселерометра можно получить выражение для определения истинных углов отклонения троса:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{P}(\alpha, \beta, \varphi) \begin{pmatrix} \mathbf{v}_{TW} + g \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = g \begin{pmatrix} \sin \beta_a \\ -\sin \alpha_a \end{pmatrix},$$

Паразитная составляющая задается выражением:

$$\mathbf{v}_{TW} = \ddot{\mathbf{X}}_s + \dot{\mathbf{P}}^T(\theta, \psi, \varphi) \mathbf{r}_{TW},$$

где \mathbf{X}_s – положение начала связанной системы координат $OXYZ$ (ССК) в ЗСК $O_g X_g Y_g Z_g$ т.е. ЦТ судна (рис. 6, а); \mathbf{r}_{TW} – координаты вектора карданового подвеса в ЗСК; α_a и β_a – абсолютные эквивалентные углы, измеряемые акселерометром; $\mathbf{P}(\alpha, \beta, \varphi)$ – матрица преобразования из ЗСК в связанную с акселерометром систему координат $O_a X_a Y_a Z_a$; $\mathbf{P}(\theta, \psi, \varphi)$ – матрица преобразования из ЗСК в ССК.

При пользовании датчика для идентификации модели судна некорректно пренебречь моментом M_{TW} , создаваемым силой натяжения троса, поэтому модифицированные уравнения энергии для идентификации параметров свободно плавающего судна с учетом одного TautWire будут иметь вид:

$$T(t_{i+1}) - T(t_i) = A_i + B_i + E_{44i} + D_{44i} + W_i,$$

где W_i – работа момента силы натяжения троса.

При условии, что система ДП набором актуаторов удерживает курс в заданной точке опытового бассейна при невозмущенной жидкости, $\beta = 0$, формула (5) преобразуется к виду:

$$\hat{\lambda}_{44} = \frac{2(A'_1 + B'_1 - A'_2 - B'_2 + W_1 - W_2) + 2\hat{c}'_{44}\Delta_{a1} - \chi'_1}{\Delta_{s1}} - \hat{a}_{44}.$$

Работу W_i определим по формуле:

$$W_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} M_{TWz} \hat{\theta} dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (T_y h_{TWz} + T_z h_{TWy}) \hat{\theta} dt.$$

Сила натяжения троса создает проекции на оси ЗСК: $T_y = T \sin \alpha$, $T_z = T \cos \alpha$. Плечи этих сил рассчитываются с учетом качки по формулам: $h_{TWy} = Y_0 + h_{TW} \sin \theta + l_{TW} \cos \theta$, $h_{TWz} = h_{TWy} \operatorname{ctg} \left(\theta + \arctg \left(\frac{Y_0 + l_{TW}}{Z_0 + h_{TW}} \right) \right)$.

Заключение

Предложен метод идентификации моделей судов на симметричных движениях по углу крена. Метод позволяет идентифицировать параметры модели судна при неизвестной структуре диссипативной функции трения и гидродинамического сопротивления модели, а также неизвестной структуре диссипативной функции трения в двигателе раскачивающего устройства с использованием только датчика тока и энкодеров угла крена и поворота маховика. Предложены структура гибридного адаптивного регулятора и алгоритм настройки основных его параметров. Представленные результаты работы регулятора демонстрируют хорошую точность при обеспечении симметрии отдельных участков движения. Результаты, которые могут быть получены предлагаемым методом, рекомендуется подтверждать вычислительными методами гидродинамики и методом плоских сечений. Приведены выражения, позволяющие определять позицию судна с системой динамического позиционирования, используя потенциометрические измерители углов или акселерометра. В дальнейшем планируется провести экспериментальное сравнение двух основных подходов к задаче поддержания натяжения троса: пассивной компенсации с использованием пневмоцилиндра (модели Bandak\Kongsberg: LTW МК 15В, FORUM Energy Technologies: D-POS TautWire и др.) и прямой активной компенсации (модели Alstom Marine: 901, Subsea Technology & Rentals: SMT, NTD, Praxis Automation Technology: Mega-Guard и др.) на стенде.

Литература

1. Alyshev A., Dudarenko N., Melnikov V. Parametric identification of reaction wheel pendulums with adaptive control // *Cybernetics and Physics*. 2018. V. 7. P. 57–65.
2. Алышев А.С. Результаты идентификации параметров тел корабельной формы по углу рыскания на симметричных движениях // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 1. С. 144–154. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-144-154
3. Алышев А.С., Мельников В.Г. Метод идентификации присоединенного момента инерции корпуса судна // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 4 (110). С. 744–748. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-744-748
4. Melnikov G.I., Dudarenko N.A., Melnikov V.G., Alyshev A.S. Parametric identification of inertial parameters // *Applied Mathematical Sciences*. 2015. V. 9. N 136. P. 6757–6765. doi: 10.12988/ams.2015.59584
5. Perez T., Blanke M. Ship roll motion control // *Proc. 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, The International Federation of Automatic Control (IFAC)*. Rostock, Germany, 2010. P. 1–12.
6. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу некоторой нелинейной системой с неизвестными параметрами и нелинейностью // *Автоматика и телемеханика*. 2007. № 6. С. 150–156.
7. Белявский А.О., Томашевич С.И. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассивации // *Управление большими системами*. 2016. № 63. С. 155–181.
8. Власов С.М., Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58. № 9. С. 713–719. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-713-719
9. Фаронов М.В., Пыркин А.А., Фуртат И.Б., Коллюбин С.А., Суrows М.О., Ведыаков А.А. Робастное управление мобильными роботами с использованием технического зрения // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 12. С. 63–65.
10. Phillips D., Haycock B. Taut wire // *Proc. Dynamic Positioning Conference*. 2014.
11. At Sea, 1944. The Taut Wire Machine on the Quarter Deck of

References

1. Alyshev A., Dudarenko N., Melnikov V. Parametric identification of reaction wheel pendulums with adaptive control. *Cybernetics and Physics*, 2018, vol. 7, pp. 57–65.
2. Alyshev A.S. Parametric identification for ship hull forms by symmetric motions around a yaw angle. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 144–154 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-144-154
3. Alyshev A.S., Melnikov V.G. Identification method for vessel hull hydrodynamic added moment of inertia. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 744–748 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-744-748
4. Melnikov G.I., Dudarenko N.A., Melnikov V.G., Alyshev A.S. Parametric identification of inertial parameters. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 136, pp. 6757–6765. doi: 10.12988/ams.2015.59584
5. Perez T., Blanke M. Ship roll motion control. *Proc. 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, The International Federation of Automatic Control, IFAC*. Rostock, Germany, 2010, pp. 1–12.
6. Bobtsov A.A., Nikolaev N.A. Output control of some nonlinear system with unknown parameters and nonlinearity. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, no. 6, pp. 1069–1074. doi: 10.1134/S0005117907060124
7. Belyavskiy A.O., Tomashevich S.I. Passivity-based method for quadrotor control. *Large-Scale Systems Control*, 2016, no. 63, pp. 155–181. (in Russian)
8. Vlasov S.M., Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Robust system of dynamic positioning for robotized model of surface craft. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 713–719. (in Russian)
9. Faronov M.V., Pyrkin A.A., Furtat I.B., Kolyubin S.A., Surows M.O., Vedyakov A.A. Robust control of mobile robots with the use of technical vision. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 12, pp. 63–65. (in Russian)
10. Phillips D., Haycock B. Taut wire. *Proc. Dynamic Positioning Conference*, 2014.
11. *At Sea, 1944. The Taut Wire Machine on the Quarter Deck of the hydrographic survey vessel HMAS*. Available at: www.awm.gov.au/collection/P02305.023 (accessed: 21.12.2018).

- the hydrographic survey vessel HMAS [Электронный ресурс]. URL: www.awm.gov.au/collection/P02305.023 (дата обращения: 21.12.2018).
12. Барабанов А.Е., Ромаев Д.В., Мирошников А.Н. Нелинейная фильтрация методом подбора сценариев для радарного слежения и динамического позиционирования судов // Сборник трудов конференции XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 2014.
 13. Wen P., Stapleton C., Li Y. Tension control of a winding machine for rectangular coils control, Automation, Robotics and Vision. *Proc. 10th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*. 2008. doi: 10.1109/ICARCV.2008.4795843
 14. Liu Z., Ni F., Miedema S.A. Optimized design method for TSHD's swell compensator, basing on modelling and simulation // Proc. Int. Conf. on Industrial Mechatronics and Automation. Chengdu, China, 2009. P. 48–52.
 15. Aamo O.M., Fossen T.I. Controlling line tension in thruster assisted mooring systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*. Hawaii, 1999. doi: 10.1109/cca.1999.801126
 16. Stephens R.I. Fibre Optic Taut Wire. Patent US 20150116697. Publ. 30.04.2015.
 17. DP Systems [Электронный ресурс]. URL: www.marineengineering.org.uk/page90.html (дата обращения: 21.12.2018).
 18. Fay H. Dynamic Positioning Systems: Principles, Design and Applications. Technip, 1990. 189 p.
 12. Barabanov A.E., Romaev D.V., Miroshnikov A.N. Nonlinear filtering by scenario selection for radar tracking and dynamic ship positioning. *Proc. XII Vserossiiskoe Soveshchanie po Problemam Upravleniya, VSPU-2014*. Moscow, 2014. (in Russian)
 13. Wen P., Stapleton C., Li Y. Tension control of a winding machine for rectangular coils control, Automation, Robotics and Vision. *Proc. 10th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2008. doi: 10.1109/ICARCV.2008.4795843
 14. Liu Z., Ni F., Miedema S.A. Optimized design method for TSHD's swell compensator, basing on modelling and simulation. *Proc. Int. Conf. on Industrial Mechatronics and Automation*. Chengdu, China, 2009, pp. 48–52.
 15. Aamo O.M., Fossen T.I. Controlling line tension in thruster assisted mooring systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*. Hawaii, 1999. doi: 10.1109/cca.1999.801126
 16. Stephens R.I. Fibre Optic Taut Wire. *Patent US 20150116697*, 2015.
 17. DP Systems. Available at: www.marineengineering.org.uk/page90.html (accessed: 21.12.2018).
 18. Fay H. *Dynamic Positioning Systems: Principles, Design and Applications*. Technip, 1990, 189 p.

Авторы

Алышев Александр Сергеевич – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57188863591, ORCID ID: 0000-0003-4517-2861, aalyshev@yandex.ru

Ромаев Дмитрий Владимирович – старший инженер-исследователь, АО «Навис», Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, Scopus ID: 35303318900, ORCID ID: 0000-0003-3679-7923, d.romaev@navisincontrol.com

Мельников Виталий Геннадьевич – доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 9432943200, ORCID ID: 0000-0002-2114-7891, v.g.melnikov@yandex.ru

Титов Алексей Михайлович – студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация; младший инженер, АО «Навис», Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8716-5534, a.titov@navisincontrol.com

Коваленко Александр Евгеньевич – студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация; младший инженер, АО «Навис», Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9088-7527, a.kovalenko@navisincontrol.com

Authors

Aleksandr S. Alyshev – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57188863591, ORCID ID: 0000-0003-4517-2861, aalyshev@yandex.ru

Dmitry V. Romaev – Senior research engineer, Navis Engineering, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, Scopus ID: 35303318900, ORCID ID: 0000-0003-3679-7923, d.romaev@navisincontrol.com

Vitaly G. Melnikov – D.Sc., Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 9432943200, ORCID ID: 0000-0002-2114-7891, v.g.melnikov@yandex.ru

Alexey M. Titov – student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation; junior engineer, Navis Engineering, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8716-5534, a.titov@navisincontrol.com

Aleksandr E. Kovalenko – student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation; junior engineer, Navis Engineering, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9088-7527, a.kovalenko@navisincontrol.com