

For citation:

Shukalov A. V., Paramonov P. P., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O. Algorithm and Methodology for Automation of Estimation Procedure of Chromaticity Coordinates of Pixel Airborne Avionics Display, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 195–204.

DOI: 10.17587/mau.16.195-204

References

1. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Informacionno-upravljajushhie sistemy* (Information and Control Systems). SPb: GUAP, 2005. 144 p. (in Russian).
2. **Zharinov I. O., Emec R. B.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2003, no. 11, pp. 193–195 (in Russian).
3. **Paramonov P. P., Koporskij N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2004, no. 3, pp. 238–245 (in Russian).
4. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Ju.** *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57. (in Russian).
5. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O.** *Datchiki i Sistemy*, 2001, no. 8, pp. 15–19 (in Russian).
6. **Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (in Russian).
7. **Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (in Russian).
8. **Martynjuk M. V.** *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva*, 2012, no. 20, pp. 81–90 (in Russian).
9. **Horunzhij M. D., Gazeeva I. V., Gusev V. P., Trubnikova T. A.** *Ocenka kachestva cvetoperedachi v sistemah vizualizacii cifrovyyh izobrazhenij: uchebnoe posobie* (Quality assessment of color in visualization systems digital imaging), Saint Petersburg, Izdatel'stvo SPbGUKiT, 2010, 95 p. (in Russian).
10. **Bondarenko M. F., Shabanov-Kushnarenko S. Ju., Shabanov-Kushnarenko Ju. P.** *Bionika Intellekta: Nauchno Tekhnicheskij Zhurnal*, 2009, no. 2, pp. 13–23 (in Russian).
11. **Horunzhij M. D.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2008, no. 1, pp. 136–144 (in Russian).
12. **Paramonov P. P., Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Dejko M. S.** *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*, 2012, no. 6, pp. 111–117 (in Russian).
13. **Sabo Ju. I., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2010, no. 3, pp. 57–63 (in Russian).
14. **Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2012, no. 2, pp. 140–141 (in Russian).
15. **Dejko M. S., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 1, pp. 124–129 (in Russian).
16. **Gajkovich A. I.** *Osnovy teorii proektirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh system* (Fundamentals of the theory of the design of complex technical systems), Saint Petersburg, NIC "MORINTEH", 2001, 432 p. (in Russian).
17. **Janos Schanda.** *Colorimetry Understanding the CIE System*. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, INC., Publication, 2007, 499 p.
18. **Agoston Zh.** *Teorija cveta i ee primenenie v iskusstve i dizajne*: Per. s angl, Moscow, Mir, 1982, 184 p. (in Russian).
19. **Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (in Russian).
20. **Zhdankin V.** *Sovremennaja Jelektronika*, 2006, no. 1, pp. 14–19 (in Russian).

Corresponding author:

Zharinov Igor O., chef of learning-scientists center, Dr. Techn. Sci, Assistance of Professor, SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatika" n. a. P. A. Efimova, 198095, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pise.net

УДК 626.02.008

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, зав. лаб., filaret@pma.ru,

А. Ю. Коноплин, ассистент, kayur-prim@mail.ru,

Н. Ю. Коноплин, лаборант, konoplin.nikita@gmail.com

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,

Дальневосточный федеральный университет

Метод синтеза систем автоматической коррекции линейных перемещений подводных аппаратов¹

Обсуждается метод синтеза системы автоматической коррекции линейных перемещений подводного аппарата. Предложенная система при нежелательных отличных от нуля значениях углов его крена и дифферента, вызванных внешними силовыми и моментными воздействиями, автоматически изменяя тяги соответствующих движителей в зависимости от текущих значений указанных углов, неизменно обеспечивает высокоточное перемещение этого аппарата в заданном направлении. Кроме того, система позволяет устранить смещения подводного аппарата от заданной пространственной траектории, вызванные его несимметричностью, а также различными значениями присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при движении этого аппарата по разным степеням свободы.

Представлены результаты моделирования, подтверждающие высокую эффективность функционирования синтезированной комплексной системы управления, которая имеет простую практическую реализацию и не требует установки на подводный аппарат дополнительного оборудования и навигационных комплексов.

Ключевые слова: подводный аппарат, система управления, автоматическая коррекция, линейные перемещения, доплеровский лаг

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Научного фонда ДВФУ (соглашение № 13-06-0112-м а), Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственное задание 1141), а также РФФИ (грант 13-07-00741).

Введение

В настоящее время с помощью телеуправляемых и обитаемых подводных аппаратов (ПА) уже выполняются многие исследовательские и технологические работы в глубинах Мирового океана. Интенсивное расширение областей использования этих ПА непрерывно повышает требования к их системам управления (СУ), которые должны обеспечивать точное перемещение указанных объектов в водной среде.

В процессе выполнения подводных работ операторы вручную с помощью органов управления или целеуказателей задают желаемые направления движения ПА. От точности перемещений ПА в заданном направлении зависит успех выполнения многих подводных технологических операций. Существующие СУ [1–3] позволяют эффективно управлять движением ПА только при отсутствии у них неконтролируемых углов крена и дифферента. Однако под влиянием моментных воздействий со стороны захваченных грузов, подводного кабеля, а также при наличии несимметричности ПА и иных возмущающих факторов у этих аппаратов в процессе движения часто появляются заранее неизвестные дифферент и крен.

Скомпенсировать нежелательные угловые смещения ПА с помощью тяг, создаваемых их движителями, в ряде случаев невозможно, так как схемы установки движителей большинства ПА не позволяют управлять углами крена и дифферента. Кроме того, постоянная стабилизация крена и дифферента в ручном режиме оказывает дополнительную нагрузку на оператора, а в автоматическом режиме требует использования специальных следящих систем [4] и приводит к значительным дополнительным энергетическим затратам.

Смещения ПА от заданного направления движения, обусловленные неуправляемым изменением их пространственной ориентации, при визуальном контакте с объектом работ могут устраняться операторами, а при наличии навигационных систем — в автоматическом режиме. Однако реализация эффективного управления при крене и дифференте ПА очень затруднена, что неизбежно снижает качество выполнения подводных технологических операций.

В результате возникает задача обеспечения точного перемещения ПА в задаваемых направлениях даже при появлении у них нежелательных произвольных углов крена и дифферента в процессе движения.

1. Постановка задачи

Требуется разработать метод синтеза эффективной системы автоматической коррекции сигналов управления линейными перемещениями ПА, обеспечивающей его точные движения в заданном направлении даже в том случае, когда ПА постоянно имеет произвольно появляющиеся углы крена и дифферента.

2. Определение выражений для автоматической коррекции вектора линейных перемещений ПА

На рис. 1 схематически показан ПА, который за счет внешнего силового и моментного воздействия в общем случае может иметь произвольные угловые смещения по крену γ и дифференту α , точно измеряемые бортовыми гироскопами.

С центром масс C ПА, который совпадает с центром его величины, совмещены начала полусвязанной $X^*Y^*Z^*$ и жестко связанной $X^*Y^*Z^*$ с его корпусом правых прямоугольных систем координат (СК). Соответствующие оси этих СК при нулевых значениях углов γ и α совпадают. При этом ось Z всегда направлена вертикально вверх, ось X^* совпадает с продольной осью ПА, а ось X совпадает с проекцией оси X^* на горизонтальную плоскость.

Вектор тяги ПА $\tau^*(t) = [\tau_x^*, \tau_y^*, \tau_z^*]^T$ всегда формируется в СК $X^*Y^*Z^*$, поскольку продольные оси его движителей, создающих соответствующие тяги, жестко связаны с этой СК. Желаемый программный вектор тяги $\tau(t) = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$ формируется оператором или программным устройством в СК XYZ (см. рис. 1). Он определяет требуемое направление перемещения ПА в абсолютной СК $X_aY_aZ_a$. Если внешние силовые и моментные воздействия отсутствуют, то за счет своей остойчивости ПА имеет нулевой крен и дифферент. В этом случае вектор $\tau^*(t)$ совпадает по направлению с вектором $\tau(t)$, а его модуль с помощью СУ ПА формируется пропорционально модулю этого вектора.

Очевидно, что при появлении ненулевых значений γ и (или) α векторы $\tau^*(t)$ и $\tau(t)$ перестают совпадать, и ПА начинает перемещаться в направлении вектора $\tau^*(t)$, а не в правильном направлении, определяемом вектором $\tau(t)$. Для сохранения заданного направления движения ПА необходимо, учитывая текущие значения углов γ и (или) α , так изменить тяги соответствующих движителей ПА, чтобы в СК $X^*Y^*Z^*$ вместо вектора $\tau^*(t)$ появился новый вектор $\tau_p(t) = [\tau_{px}, \tau_{py}, \tau_{pz}]^T$, совпадающий в пространстве с вектором $\tau(t)$.

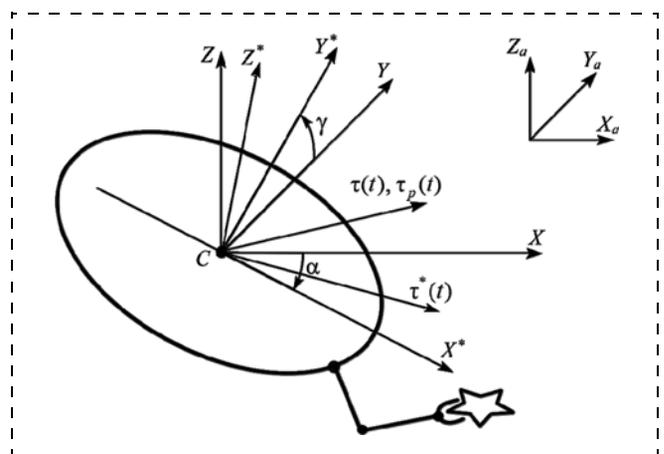


Рис. 1. Схема расположения осей СК XYZ и $X^*Y^*Z^*$ на ПА

Зная элементы вектора $\tau(t)$ в СК XYZ , элементы совпадающего с ним вектора $\tau_p(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$ можно получить с помощью выражения [5]

$$\tau_p(t) = R^T \tau(t), \quad (1)$$

где $R \in R^{3 \times 3}$ — матрица поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ относительно СК XYZ , T — символ транспонирования.

Для определения элементов матрицы R необходимо представить поворот ПА вместе с СК $X^*Y^*Z^*$ в виде последовательности элементарных поворотов. При этом оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК $X^*Y^*Z^*$, и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы α и γ действительно соответствовали углам, которые будут измеряться бортовыми гироскопами [6]. Это условие выполняется при следующей последовательности элементарных поворотов СК $X^*Y^*Z^*$: вначале осуществляется ее поворот на угол α вокруг оси Y (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{Y, \alpha}$), а затем поворот на угол γ вокруг оси X^* (ему соответствует матрица элементарного поворота $R_{X^*, \gamma}$). Указанные матрицы поворотов имеют стандартный вид [7]:

$$R_{Y, \alpha} = \begin{bmatrix} C\alpha & 0 & S\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\alpha & 0 & C\alpha \end{bmatrix}, \quad R_{X^*, \gamma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ 0 & S\gamma & C\gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $S\alpha = \sin\alpha$; $S\gamma = \sin\gamma$; $C\alpha = \cos\alpha$; $C\gamma = \cos\gamma$.

С учетом выражения (2) матрица R для описанной последовательности поворотов СК $X^*Y^*Z^*$ вместе с ПА имеет вид

$$R = R_{Y, \alpha} R_{X^*, \gamma} = \begin{bmatrix} C\alpha & S\alpha S\gamma & S\alpha C\gamma \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ -S\alpha & C\alpha S\gamma & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Необходимо подчеркнуть, что для определения элементов вектора $\tau_p(t)$ в выражении (1) можно использовать только матрицу (3), так как составленная посредством другой последовательности элементарных поворотов любая другая матрица не может быть реализована с использованием углов γ и α , измеряемых бортовыми гироскопическими приборами.

После подстановки транспонированной матрицы R в выражение (1) получим:

$$\tau_p(t) = \begin{bmatrix} \tau_x C\alpha - \tau_z S\alpha \\ \tau_x S\alpha S\gamma + \tau_y C\gamma + \tau_z C\alpha S\gamma \\ \tau_x S\alpha C\gamma - \tau_y S\gamma + \tau_z C\alpha C\gamma \end{bmatrix}.$$

В результате использование предложенной коррекции позволит оператору управлять желаемым вектором тяги $\tau(t)$, не учитывая появление у ПА произвольных углов α и γ . При этом разработанная система должна обеспечивать перемещения ПА в заданном направлении в СК $X_a Y_a Z_a$.

3. Исследование работы системы

Для исследования особенностей функционирования и эффективности системы коррекции линейных перемещений ПА использована математическая модель [3], упрощенная до шести нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих только поступательное движение ПА:

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau^*(t), \\ \dot{\eta} = J(\eta)v(t),$$

где $M \in R^{3 \times 3}$ — матрица массы ПА и присоединенных масс жидкости; $D(v) \in R^{3 \times 3}$ — матрица гидродинамических сил; $g(\eta) \in R^3$ — вектор гидростатических сил; $v(t) = [v_x, v_y, v_z]^T$ — вектор текущей скорости поступательного движения ПА в СК $X^*Y^*Z^*$; $J(\eta) \in R^{3 \times 3}$ — матрица перехода из СК $X^*Y^*Z^*$ в СК $X_a Y_a Z_a$; $\eta = [x_a, y_a, z_a]^T$ — вектор положения точки C в СК $X_a Y_a Z_a$.

Параметры модели ПА имеют следующие значения: $m_a = 300$ кг — масса ПА; $\lambda_{11} = 120$ кг, $\lambda_{22} = 140$ кг, $\lambda_{33} = 140$ кг ($\lambda_{ij} = 0, i \neq j, i, j = (1, 3)$) — соответствующие присоединенные массы жидкости; $Y_c = 0,02$ м — метацентрическая высота ПА; $d_{1x} = 40$ кг · с⁻¹, $d_{1y} = 50$ кг · с⁻¹, $d_{1z} = 50$ кг · с⁻¹ — коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной, а $d_{2x} = 15$ кг · м⁻¹, $d_{2y} = 25$ кг · м⁻¹, $d_{2z} = 25$ кг · м⁻¹ — квадратичной зависимостям гидродинамических сил от скорости движения ПА по его отдельным степеням свободы.

С помощью средств адаптивной коррекции [1] все движители ПА представлены в виде апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени $T_d = 0,1$ с и коэффициентами усиления $K_d = 2$, а в модели описаны соответствующими дифференциальными уравнениями первого порядка.

При моделировании ПА имел $\alpha = 30^\circ$, а $\tau(t) = [15, 0, 0]^T$. В этом случае аппарат должен совершать прямолинейное движение в горизонтальной плоскости СК $X_a Y_a Z_a$, совпадающее осью X_a . На рис. 2 показаны смоделированные перемещения ПА x_{a1} и z_{a1} в СК $X_a Y_a Z_a$ без использования синхронизированной системы, а также его перемещения x_{a2} и z_{a2} при введении предложенной коррекции.

Из рис. 2 видно, что наличие неучтенного дифферента в процессе движения ПА за 70 с приводит к его незапланированному смещению по оси Z_a

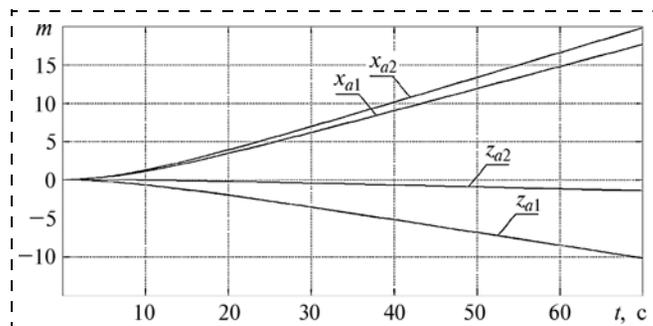


Рис. 2. Линейные перемещения ПА

на 10 м. Использование синтезированной коррекции, формирующей вектор $\tau_p(t)$, позволяет в 6,6 раза уменьшить смещение ПА z_{a2} по оси Z_a от предписанной прямолинейной траектории его движения, но это смещение все равно достигает 1,5 м. Причиной последнего является несимметричность ПА, а также различные значения присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при его движении по разным степеням свободы.

Если эти незначительные отклонения в процессе движения ПА становятся недопустимыми, то они могут устраняться оператором или автоматически за счет дополнительной коррекции вектора $\tau(t)$. При автоматической коррекции этого вектора целесообразно использовать информацию о текущем направлении $v(t)$, определяемом доплеровским лагом. Ниже будет рассмотрена система, обеспечивающая указанную автоматическую коррекцию вектора $\tau(t)$ с помощью доплеровского лага.

4. Дополнительная автоматическая коррекция вектора тяги ПА

Современные доплеровские лаги позволяют точно определить элементы вектора $v(t)$ в СК $X^*Y^*Z^*$ [7]. При смещении реального направления движения ПА, имеющего ненулевые углы α и γ , от направления, задаваемого в СК $X^*Y^*Z^*$ вектором $\tau_p(t)$, между векторами $v(t)$ и $\tau_p(t)$ возникает ненулевой угол $\varphi = \arccos\left(\frac{\tau_p(t)v(t)}{\|\tau_p(t)\|\|v(t)\|}\right)$ (рис. 3). Очевидно, что для движения ПА в направлении, определяемом вектором $\tau_p(t)$, его СУ должна обеспечивать обнуление угла φ , формируя новый вектор тяги $\tau_d(t) = \tau_p(t) + \tau_k(t) \neq \tau_p(t)$, лежащий в плоскости, образованной векторами $\tau_p(t)$ и $v(t)$ (см. рис. 3). Здесь

$\tau_k(t) = k \frac{\mu(t)}{\|\mu(t)\|} \in R^3$ — дополнительный вектор тяги, перпендикулярный вектору $\tau_p(t)$, направленный в сторону компенсации угла φ и лежащий в одной плоскости с векторами $\tau_p(t)$, $v(t)$; k — положительный коэффициент, значение которого выбирается экспериментально с учетом конструкции ПА; $\mu(t) = \tau_l(t) - v(t) \in R^3$ — вектор, определяющий направление вектора $\tau_k(t)$; $\tau_l(t) = \frac{\tau_p(t)}{\|\tau_p(t)\|} \|v(t)\| \cos\varphi$.

При $\|\mu(t)\| = 0$ СУ ПА формирует $\tau_k(t) = 0$. При $\|\tau_p(t)\| = \|v(t)\| = 0$ угол φ не вычисляется, так как ПА не движется.

Схема автоматической следящей системы, обеспечивающей условие $\varphi \rightarrow 0$, представлена на рис. 4. На этой схеме введены следующие обозначения: БФТ — блок формирования вектора $\tau_p(t)$ согласно выражению (1); Г — блок гироскопов, измеряющий углы α и γ ; АЛ — абсолютный доплеровский лаг; ДК — движительный комплекс ПА; СУ — система управления ДК; БВ1 — блок вычисления угла φ ; БВ2 — блок вычисления вектора $\tau_k(t)$; $\tau_d^*(t)$ — реальный вектор тяги, формируемый ДК и действующий на ПА в процессе его движения; $f(t) \in R^6$ — вектор внешних силовых и моментных воздействий на ПА, приводящий к появлению ненулевых углов α и γ .

Схема автоматической следящей системы, обеспечивающей условие $\varphi \rightarrow 0$, представлена на рис. 4. На этой схеме введены следующие обозначения: БФТ — блок формирования вектора $\tau_p(t)$ согласно выражению (1); Г — блок гироскопов, измеряющий углы α и γ ; АЛ — абсолютный доплеровский лаг; ДК — движительный комплекс ПА; СУ — система управления ДК; БВ1 — блок вычисления угла φ ; БВ2 — блок вычисления вектора $\tau_k(t)$; $\tau_d^*(t)$ — реальный вектор тяги, формируемый ДК и действующий на ПА в процессе его движения; $f(t) \in R^6$ — вектор внешних силовых и моментных воздействий на ПА, приводящий к появлению ненулевых углов α и γ .

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования линейного перемещения ПА в горизонтальной плоскости с применением синтезированной комплексной СУ, изображенной на рис. 4, при условии, что в начале движения и далее он имел неизменяемый дифферент ($\alpha = 30^\circ$), $k = 10$, а задающим устройством в СК XYZ формировался желаемый вектор тяги $\tau(t) = [15, 0, 0]^T$.

Из рис. 5 видно, что даже при наличии большого дифферента ПА достаточно точно движется в горизонтальной плоскости в направлении, определяемом вектором $\tau(t)$. Его отклонение от заданной горизонтальной плоскости через 70 с после начала движения не превышает 0,3 м. Это незначительное

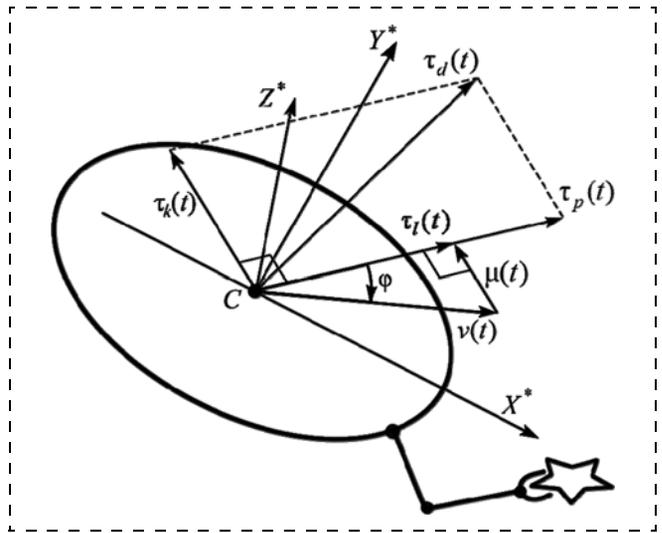


Рис. 3. ПА и скорректированный вектор тяги

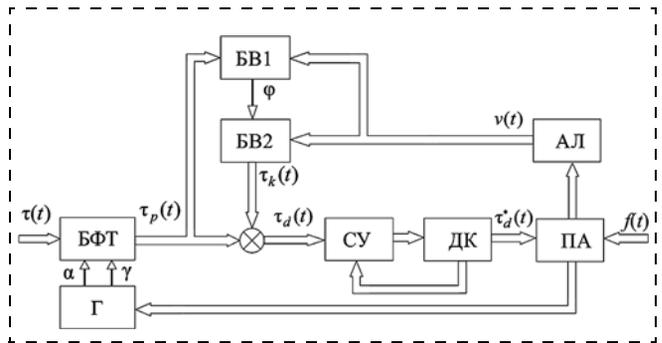


Рис. 4. Обобщенная схема синтезированной системы

тема управления ДК; БВ1 — блок вычисления угла φ ; БВ2 — блок вычисления вектора $\tau_k(t)$; $\tau_d^*(t)$ — реальный вектор тяги, формируемый ДК и действующий на ПА в процессе его движения; $f(t) \in R^6$ — вектор внешних силовых и моментных воздействий на ПА, приводящий к появлению ненулевых углов α и γ .

5. Исследование работы системы комплексной коррекции тяг ПА

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования линейного перемещения ПА в горизонтальной плоскости с применением синтезированной комплексной СУ, изображенной на рис. 4, при условии, что в начале движения и далее он имел неизменяемый дифферент ($\alpha = 30^\circ$), $k = 10$, а задающим устройством в СК XYZ формировался желаемый вектор тяги $\tau(t) = [15, 0, 0]^T$.

Из рис. 5 видно, что даже при наличии большого дифферента ПА достаточно точно движется в горизонтальной плоскости в направлении, определяемом вектором $\tau(t)$. Его отклонение от заданной горизонтальной плоскости через 70 с после начала движения не превышает 0,3 м. Это незначительное

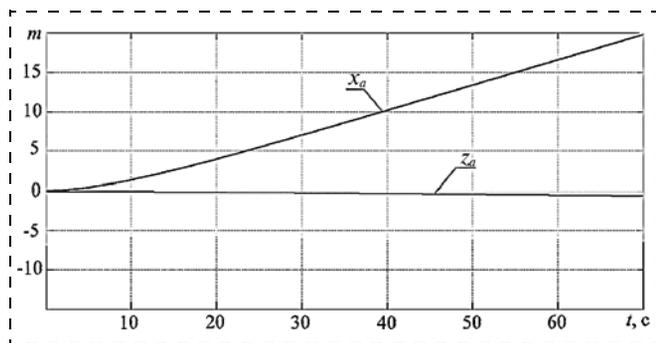


Рис. 5. Результаты моделирования работы синтезированной комплексной системы коррекции линейных перемещений ПА

отклонение обусловлено зоной нечувствительности при определении величины φ . С учетом полученных результатов моделирования можно утверждать, что использование синтезированной комплексной СУ позволяет автоматически учесть и успешно компенсировать влияние углов дифферента и крена при движении ПА на его заданное линейное перемещение к цели.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод синтеза системы автоматической коррекции линейных перемещений ПА, которая при произвольных отличных

от нуля значениях углов его крена и дифферента, автоматически изменяя тяги соответствующих двигателей в зависимости от текущих значений указанных углов, неизменно обеспечивает высокоточное перемещение этого аппарата в абсолютной СК в заданном направлении.

Разработанная система имеет простую практическую реализацию и не требует установки на ПА дополнительного оборудования и навигационных комплексов.

Список литературы

1. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами / Под ред. В. Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
2. Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 270 с.
3. Fossen T. I. Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
4. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.
5. Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. McGraw-Hill, 1987. 580 p.
6. Фридендер Г. О., Козлов М. С. Авиационные гироскопические приборы. М.: Оборонгиз 1961 г., 390 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1973 г., 832 с.
8. Виноградов К. А., Кошкарев В. Н., Осюхин Б. А., Хреbtов А. А. Абсолютные и относительные лаги: Справочник. Л.: Судостроение, 1990 г., 264 с.

Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of the Linear Displacements of the Underwater Vehicles

V. F. Filaretov, filaret@pma.ru, A. Yu. Konoplin, kayur-prim@mail.ru,
N. Yu. Konoplin, konoplin.nikita@gmail.com

Far Eastern Federal University, Sukhanova 8, Vladivostok 690950, Russia,
Institute for automation and control processes Far Eastern Branch of RAS, 690041, Vladivostok, Russia

Date received: 28.08.14

This work describes the synthesis method for the system of automatic correction of linear displacements of the underwater vehicles. Often in the process of movement of an underwater vehicle the angles of roll and trim appear under the influence of torque impacts by grasped cargo, underwater cable, vehicle asymmetry and other perturbing factors. In some cases it is impossible to compensate for the unwanted angular underwater vehicle displacements with the help of thrust created by its propulsors. Uncontrollable changes in the spatial orientation of an underwater vehicle misroute it from the given direction. As a result, there is a problem of an accurate vehicle movement in a given direction even, notwithstanding the uncontrollable angles of roll and trim.

In presence of the external forces and torques of the arbitrary non-zero values of the angles of roll and trim the proposed system automatically changes the corresponding propulsors' thrusts depending on the current values of the said angles. It ensures a high-accuracy underwater vehicle movement in a direction. Besides, the developed system allows us to eliminate the underwater vehicle's displacement from a given spatial trajectory, caused by the asymmetry of the vehicle and different values of the added mass of fluid and viscous friction coefficient when the underwater vehicle moves with different degrees of freedom.

As a result of using the proposed correction, an operator can control the desired torque vector of an underwater vehicle without considering the appearance of the arbitrary roll and trim angles. The results of the performed numerical simulations proved high efficiency of the synthesized complex control system, which has simple practical implementation and does not require installation of additional equipment and navigation systems for the underwater vehicles.

Keywords: underwater vehicle, control system, automatic correction, linear displacements, Doppler log

For citation:

Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of the Linear Displacements of

the Underwater Vehicles, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 204–209.

DOI: 10.17587/mau.16.204-209

References

1. **Filaretov V. F., Alekscev Yu. K., Lebedev A. V.** *Sistemy upravleniya podvodnymi robotami* (Control systems for underwater robots), Moscow, Kruglyi god, 2001, 288 p. (in Russian).
2. **Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yukhimets D. A.** *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* (Devices and control systems of underwater robots), Moscow, Nauka, 2005, 270 p. (in Russian).
3. **Fossen T. I.** *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
4. **Filaretov V. F., Konoplin A. Yu.** System of automatic stabilization of underwater vehicle in stationkeeping regime with working multilink manipulator. Part 2, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 7, pp. 29–34 (in Russian).
5. **Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G.** *Robotics: Control, sensing, vision and intelligence*, McGraw-Hill, 1987, 580 p.

6. **Fridlender G. O., Kozlov M. S.** *Aviatsionnye giroskopicheskie pribory* (Aeronautical gyroscopic instruments), Moscow, Oborongiz, 1961, 390 p. (in Russian).
7. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers), Moscow, 1973, 832 p. (in Russian).
8. **Vinogradov K. A., Koshkarev V. N., Osyukhin B. A., Khrebtov A. A.** *Absolyutnye i otnositel'nye lagi: Spravochnik* (Absolute and relative logs: Handbook), Leningrad, Sudostroenie, 1990, 264 p. (in Russian).

Corresponding author:

Filaretov Vladimir F., Doctor of Technical Science, Head of Laboratory Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of RAS, Radio str., 5690041, Vladivostok, Russian Federation; Tel. (office): (4232) 313783, Fax: (4232) 310452, e-mail: filaret@pma.ru

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., bendor@iacp.dvo.ru,
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Динамическое воздействие "волны-убийцы" на контур морского судна

На основе метода вычислительной гидродинамики разработана технология моделирования динамического воздействия "волны-убийцы" на контур морского судна. Получены зависимости от времени скоростей и сил перемещения контура, угла, угловой скорости и ускорения, момента сил и момента импульса контура. Установлено, что контуры судов водоизмещением до 92 600 т опрокидываются "волнами-убийцами" высотой 30 м. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании морских судов, а также при разработке мероприятий по обеспечению безопасности судоходства.

Ключевые слова: "волна-убийца", вычислительная гидродинамика, контур судна, момент силы, момент импульса, угол крена, опрокидывание судна, безопасность судоходства

Введение

"Волны-убийцы" представляют особую опасность для морских судов. Высота таких волн может достигать 30 м, при этом они возникают внезапно как в штормовых условиях, так и при относительно тихой погоде [1]. Теоретическая оценка вероятности возникновения "волны-убийцы" [2] показывает, что она может возникнуть один раз в несколько десятков лет. Тем не менее, считается, что за период 1968—1994 гг. от действия "волн-убийц" погибли или получили повреждение 22 супертанкера [3]. В 2000...2003 гг. Европейским союзом был профинансирован проект "MaxWave" [4] по мониторингу поверхности мирового океана с помощью радарных спутников ERS-1 и ERS-2 Европейского космического агентства. Результаты исследований показали, что "волны-убийцы" возникают чаще [5], чем предсказывается теорией. Например, за период 2006...2010 гг. было зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [6]. Воздействие "волны-убийцы" (далее — аномальная волна) на морское судно может проявиться как в опрокидывании, так и нарушении целостности его конструкции за счет возникновения больших давлений в местах удара указанной волны [7]. Если нарушения целостности можно

предупредить путем проектирования более прочных судов, то избежать опрокидывания судов при встрече с аномальной волной не представляется возможным из-за внезапности возникновения волны и кратковременности подобной встречи. Все это предопределяет актуальность изучения воздействия аномальных волн на морские суда.

Опрокидывание морского судна в результате воздействия аномальной волны представляет собой особый случай движения судна на волнении. Нелинейность процесса движения столь существенна, что даже в рамках теории потенциального движения невязкой жидкости учет конечности амплитуд и скоростей качки приводит к сложным нелинейным граничным условиям [8]. Сложность достаточно строгого подхода к определению гидродинамических сил в задаче об опрокидывании судна заставляет обращаться к экспериментальным или вычислительным методам исследований. В качестве примера можно привести ряд исследований воздействия аномальных волн на морские суда, в которых выполнен анализ фактического материала морских происшествий [9, 10], представлен обзор экспериментальных и численных методов изучения опрокидывания судов в экстремальных условиях [11], выполнены экспериментальные исследования в