

## Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона

© Е.А. Лямина, С.А. Егоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Сфера применения необитаемых подводных аппаратов увеличивается, появляются задачи, требующие управления аппаратами при больших углах наклона. В то же время вопрос применимости традиционных подходов к решению данной задачи плохо изучен. Построение системы управления положением подводного аппарата для случая больших углов наклона рассмотрено на основе традиционного метода управления ориентацией в углах Эйлера — Крылова. В ходе исследования выведен общий вид передаточной матрицы системы управления угловой ориентацией аппарата. Показано, что с ростом углов наклона передаточная матрица системы становится многосвязной. Предложены алгоритмы компенсации появляющихся возмущений. Полученные результаты проверены методами математического моделирования. Предложенные в работе алгоритмы компенсации позволяют расширить диапазоны значений рабочих углов и улучшить качество работы системы управления угловой ориентацией существующих необитаемых подводных аппаратов без значительной переработки ее структуры.*

**Ключевые слова:** *большие углы наклона, дифферент, управление положением, подводный аппарат, компенсация перекрестных связей*

**Введение.** Необитаемые подводные аппараты (НПА) эксплуатируются, как правило, при нулевых значениях углов наклона или не предъявляют жестких требований к системе управления (СУ) ориентацией при больших отклонениях по дифференту и крену. Традиционно СУ угловой ориентацией таких аппаратов рассматривается как СУ сепаратными каналами курса, дифферента и крена без учета перекрестных связей между каналами [1], что для таких режимов работы вполне достаточно.

Однако в некоторых случаях возникают требования к работоспособности НПА при больших углах наклона и больших пространственных поворотах. В качестве примера можно привести следующие операции:

1) обследование и маневрирование в условиях ограниченного пространства [2–4], в частности осмотр тоннелей системы охлаждения ядерных реакторов (телеуправляемый НПА V8 SP компании Ocean Modules), подводных пещер [2], заход НПА в люки и т. п.;

2) стыковка НПА с подводными объектами, расположенными под наклоном [4];

3) видео- и гидроакустический «осмотр» объектов под разными углами наклона [5];

4) осмотр и дефектоскопия корпусов судов, гребных винтов и различных донных конструкций [5, 6];

5) проведение противоминных операций [7], включая осмотр надводных конструкций (телеуправляемый НПА DOUBLE EAGLE компании SAAB — Seaeye);

6) применение НПА как носителя модуля радиосвязи для подводных лодок (НПА SUBROV компании SAAB — Seaeye).

Очевидно, что для выполнения указанных операций необходимо, чтобы СУ ориентацией позволяла НПА маневрировать и «зависать» при больших углах наклона (более  $45^\circ$ ). При этом можно выделить два основных подхода к построению активных систем ориентации твердого тела: с разделением на отдельные каналы и экстенсивный [8]. При методе управления с разделением на отдельные каналы приведение НПА к заданному положению в пространстве осуществляется тремя поворотами вокруг связанных с аппаратом осей, а при экстенсивном методе — поворотом на заданный угол вокруг некоторой мгновенной оси.

В подводной робототехнике наибольшее распространение получил метод управления с разделением на отдельные каналы. Однако при больших углах наклона применение такого принципа управления для стабилизации НПА имеет некоторые особенности и ограничения [7].

К особенностям метода управления ориентацией НПА с разделением на отдельные каналы можно отнести:

1) вырождение кинематических уравнений при угле дифферента  $\pm 90^\circ$ ;

2) усиление влияния перекрестных связей между каналами с ростом углов наклона;

3) изменение параметров каналов управления угловым положением НПА с изменением углов дифферента и крена.

Проблема вырождения кинематических уравнений может быть решена переключением между системами ориентации, использующими разные последовательности углов поворота [9], а значит, имеющих различные углы, при которых вырождаются кинематические уравнения.

Далее будет показано, что такие проблемы, как изменение параметров каналов управления и увеличение влияния перекрестных связей между ними с ростом углов наклона, вызваны неодинаковостью параметров углового движения НПА. Различия параметров по каналам угловой ориентации, а следовательно, и их передаточных функций связаны с особенностями в расположении движителей, характеристиками самого движительно-рулевого комплекса, неодинаковыми

моментами инерции НПА, наличием компенсирующего момента от силы Архимеда в некоторых каналах и прочими факторами. Вследствие этого при использовании традиционного подхода с ростом углов дифферента и крена ухудшается качество переходных процессов и возможна потеря устойчивости СУ ориентацией.

Цель данной работы — построить СУ угловой ориентацией НПА в углах Эйлера — Крылова, работоспособную при больших углах наклона (случай, когда дифферент аппарата  $\pm 90^\circ$ , не рассматривается) и основанную на принципе управления с разделением на отдельные каналы. Для построения такой СУ предлагается вывести и проанализировать общий вид передаточной матрицы СУ угловой ориентацией НПА, привести полученную передаточную матрицу к автономному виду, проанализировать полученные алгоритмы и работу СУ при их упрощении.

**Математическая модель НПА.** Пространственное движение НПА описывают как суперпозицию поступательного движения его полюса и вращательного движения относительно этого полюса. В рамках данной работы рассматривается только вращательное движение НПА, которое задается тремя последовательными поворотами системы координат  $Ox_yz$ , связанной с НПА, на углы курса, дифферента и крена относительно системы координат  $Ox_gy_gz_g$ , полусвязанной с НПА.

При этом система координат  $Ox_gy_gz_g$  задана следующим образом: начало координат  $O$  совмещено с центром масс НПА, ось  $Ox_g$  направлена на север по касательной к меридиану,  $Oz_g$  — по касательной к параллели на восток, а ось  $Oy_g$  — вдоль вертикали места вверх. Начало координат системы  $Ox_yz$ , связанной с НПА, так же как и  $Ox_gy_gz_g$ , совпадает с центром масс НПА, ось  $Ox$  направлена вдоль продольной оси в носовую часть аппарата, ось  $Oy$  лежит в диаметральной плоскости НПА и направлена вверх, а ось  $Oz$  направлена в его правый борт.

Кинематические уравнения движения НПА представляют собой уравнения Эйлера и могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\dot{\psi}$ ,  $\dot{\vartheta}$ ,  $\dot{\gamma}$  — угловые скорости НПА по курсу, дифференту и крену соответственно;  $\vartheta$ ,  $\gamma$  — углы дифферента и крена;  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  — угловые скорости относительно связанных с НПА осей  $Oy$  и  $Oz$  соответственно.

Для моделирования динамики НПА воспользуемся упрощенной математической моделью движения, рассмотренной в работах [1, 10]. Она адекватно отражает процессы, происходящие в системе, удобна для анализа и описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} (J_x + \lambda_{44})\dot{\omega}_x &= M_{дв\ x} + M_{а\ x} + M_{в\ x} + M_{г\ x}, \\ (J_y + \lambda_{55})\dot{\omega}_y &= M_{дв\ y} + M_{а\ y} + M_{в\ y} + M_{г\ y}, \\ (J_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z &= M_{дв\ z} + M_{а\ z} + M_{в\ z} + M_{г\ z}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J_x, J_y, J_z$  и  $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$  — моменты инерции и присоединенные моменты инерции НПА относительно осей  $Ox, Oy, Oz$  соответственно;  $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  — угловые ускорения НПА относительно осей  $Ox, Oy, Oz$  соответственно;  $M_{дв\ x}, M_{дв\ y}, M_{дв\ z}, M_{а\ x}, M_{а\ y}, M_{а\ z}, M_{в\ x}, M_{в\ y}, M_{в\ z}, M_{г\ x}, M_{г\ y}, M_{г\ z}$  — моменты от силы тяги движителей, силы Архимеда, возмущающих сил и гидродинамических сил сопротивления относительно осей  $Ox, Oy, Oz$  системы координат, связанной с НПА, соответственно.

Ввиду того что одним из требований к НПА, управляемым при больших углах наклона, является уменьшение статической устойчивости, для упрощения примем метацентрическую высоту аппарата равной нулю. Это означает, что моменты от силы Архимеда отсутствуют, т. е.  $M_{а\ x} = M_{а\ y} = M_{а\ z} = 0$ .

Используя результаты работы [10], представим моменты  $M_{г\ x}, M_{г\ y}, M_{г\ z}$  от гидродинамических сил сопротивления в виде

$$M_{г\ i} = -C_{\omega_i 1} \omega_i |\omega_i| - C_{\omega_i 2} \omega_i, \quad i = x, y, z, \quad (3)$$

где  $C_{\omega_i 1}, C_{\omega_i 2}$  — приведенные гидродинамические коэффициенты.

После линеаризации уравнений (1) получим следующие уравнения системы:

$$T_{ПА\ i} \dot{\omega}_i + \omega_i = K_{ПА\ i} M_{дв\ i}, \quad i = x, y, z. \quad (4)$$

Здесь  $T_{ПА\ i}$  и  $K_{ПА\ i}$  — постоянная времени и коэффициент усиления для вращательного движения подводного аппарата относительно связанной системы координат  $Oxyz$ :

$$T_{ПА\ i} = \frac{J_i + \lambda_{jj}}{2C_{\omega_i 1} \omega_i^* + C_{\omega_i 2}}, \quad j = 4, 5, 6;$$

$$K_{\text{ПА}i} = \frac{1}{2C_{\omega_i 1} \omega_i^* + C_{\omega_i 2}},$$

где  $\omega_i^*$  — параметр линеаризации.

Моменты, создаваемые движительно-рулевым комплексом, можно записать в следующем виде:

$$M_{\text{дв}i} = \sum F_{\text{дв}k} h_k, \quad i = x, y, z; \quad k = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где  $F_{\text{дв}k}$  — сила тяги  $k$ -го движителя;  $h_k$  — плечо, соответствующее этой силе;  $n$  — количество движителей.

Согласно работам [1, 10], динамика движителя описывается аperiодическим звеном первого порядка, поэтому уравнение (5) можно записать следующим образом:

$$T_{\text{дв}k} \frac{dM_{\text{дв}i}}{dt} + M_{\text{дв}i} = 2h_k K_{\text{дв}k} U, \quad (6)$$

где  $T_{\text{дв}k}$ ,  $K_{\text{дв}k}$  — постоянная времени и коэффициент усиления движителя соответственно;  $U$  — напряжение, поданное на движители.

В соответствии с формулами (3)–(6) для дальнейших расчетов математическую модель НПА можно аппроксимировать аperiодическим звеном второго порядка.

**Передаточная матрица системы управления ориентацией НПА.** Рассмотрим многомерную систему автоматического управления (МСАУ) ориентацией НПА в углах Эйлера — Крылова с различными параметрами каналов движения вокруг связанных с НПА осей (рис. 1).

Система управления построена следующим образом: рассогласование  $\varepsilon_\psi$ ,  $\varepsilon_\vartheta$ ,  $\varepsilon_\gamma$  текущего и заданного значений углов поступает на блок регулятора с передаточной функцией  $W_{\text{рег}\psi}$ ,  $W_{\text{рег}\vartheta}$  и  $W_{\text{рег}\gamma}$ , что может быть записано в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \dot{\psi}^\circ &= \varepsilon_\psi W_{\text{рег}\psi}, \\ \dot{\vartheta}^\circ &= \varepsilon_\vartheta W_{\text{рег}\vartheta}, \\ \dot{\gamma}^\circ &= \varepsilon_\gamma W_{\text{рег}\gamma}. \end{aligned} \quad (7)$$

Заданные значения угловых скоростей  $\dot{\psi}^\circ$ ,  $\dot{\vartheta}^\circ$ ,  $\dot{\gamma}^\circ$  по курсу, дифференту и крену поступают на блок матрицы  $\mathbf{P}^{-1}$ , в которой в соответствии с обратными кинематическими уравнениями Эйлера они преобразуются в заданные угловые скорости  $\omega_x^\circ$ ,  $\omega_y^\circ$ ,  $\omega_z^\circ$  относительно связанных с НПА осей:

$$\begin{aligned} \omega_x^\circ &= \dot{\gamma}^\circ + \dot{\psi}^\circ \sin \vartheta_{\text{тек}}, \\ \omega_y^\circ &= \dot{\vartheta}^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} + \dot{\psi}^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} \cos \vartheta_{\text{тек}}, \\ \omega_z^\circ &= \dot{\vartheta}^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} - \dot{\psi}^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} \cos \vartheta_{\text{тек}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\vartheta_{\text{тек}}, \gamma_{\text{тек}}$  — текущие значения углов дифферента и крена соответственно.

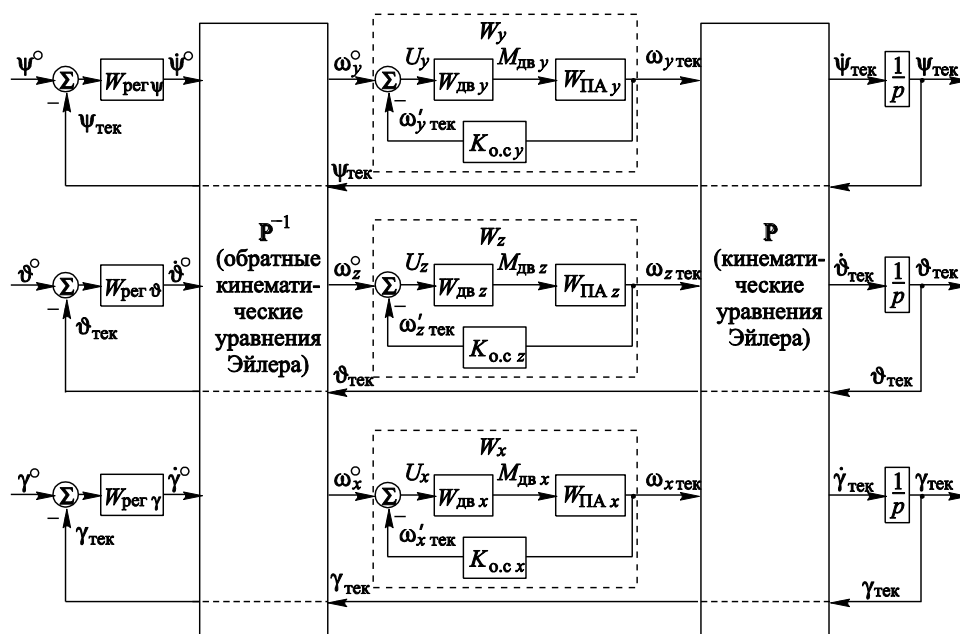


Рис. 1. Структурная схема МСАУ угловой ориентацией НПА

В соответствии с заданными угловыми скоростями  $\omega_x^\circ, \omega_y^\circ, \omega_z^\circ$  формируются напряжения  $U_x, U_y, U_z$ , которые поступают на движительно-рулевой комплекс НПА с передаточной функцией  $W_{дв i}$  для формирования моментов относительно связанных с аппаратом осей. Моменты  $M_{дв x}, M_{дв y}, M_{дв z}$ , сформированные движительно-рулевым комплексом, изменяют угловые скорости НПА и его угловую ориентацию. Информационно-измерительный комплекс измеряет текущие угловые скорости относительно связанных с аппаратом осей, что можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \omega_{x \text{ тек}} &= W_x \omega_x^\circ, \\ \omega_{y \text{ тек}} &= W_y \omega_y^\circ, \\ \omega_{z \text{ тек}} &= W_z \omega_z^\circ, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $W_x, W_y, W_z$  — часть передаточных функций канала управления НПА, заключенная между матрицами  $\mathbf{P}^{-1}$  и  $\mathbf{P}$  (см. рис. 1).

В данной работе при моделировании углового движения НПА в  $W_x, W_y, W_z$  учитывались передаточные функции движительно-рулевого комплекса, НПА и демпфирующая обратная связь (с коэффициентом усиления  $K_{oc}$ ) по угловой скорости. Без потери общности рассматриваемый подход может быть применен и для других структур.

Текущие угловые скорости поступают в матрицу  $\mathbf{P}$  для получения угловых скоростей по курсу  $\dot{\psi}_{\text{тек}}$ , крену  $\dot{\gamma}_{\text{тек}}$  и дифференту  $\dot{\vartheta}_{\text{тек}}$  в соответствии с уравнениями Эйлера (1). Угловые скорости интегрируются и поступают в СУ в качестве обратной связи (в реальности демпфируются информационно-измерительным комплексом):

$$\begin{aligned}\Psi_{\text{тек}} &= \frac{1}{p} \dot{\psi}_{\text{тек}}, \\ \vartheta_{\text{тек}} &= \frac{1}{p} \dot{\vartheta}_{\text{тек}}, \\ \gamma_{\text{тек}} &= \frac{1}{p} \dot{\gamma}_{\text{тек}},\end{aligned}\tag{10}$$

где  $p$  — оператор Лапласа.

Подставляя в выражения (10) уравнения (7)–(9), получаем следующую передаточную матрицу разомкнутой системы:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \Psi_{\text{тек}} \\ \vartheta_{\text{тек}} \\ \gamma_{\text{тек}} \end{bmatrix} &= \frac{1}{p} \times \\ &\times \begin{bmatrix} W_{\text{пер } \psi} (W_y \cos^2 \gamma + W_z \sin^2 \gamma) & \frac{\sin 2\gamma}{2 \cos \vartheta} W_{\text{пер } \vartheta} (W_y - W_z) & 0 \\ \frac{1}{2} \sin 2\gamma \cos \vartheta W_{\text{пер } \psi} (W_y - W_z) & W_{\text{пер } \vartheta} (W_z \cos^2 \gamma + W_y \sin^2 \gamma) & 0 \\ \sin \vartheta W_{\text{пер } \psi} [W_x - (W_y \cos^2 \gamma + W_z \sin^2 \gamma)] & \frac{1}{2} \sin 2\gamma \operatorname{tg} \vartheta W_{\text{пер } \vartheta} (W_y - W_z) & W_{\text{пер } \gamma} W_x \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \Psi^\circ \\ \vartheta^\circ \\ \gamma^\circ \end{bmatrix}.\end{aligned}\tag{11}$$

Структурная схема, поясняющая работу МСАУ ориентацией НПА в соответствии с полученной передаточной матрицей (11), представлена на рис. 2.

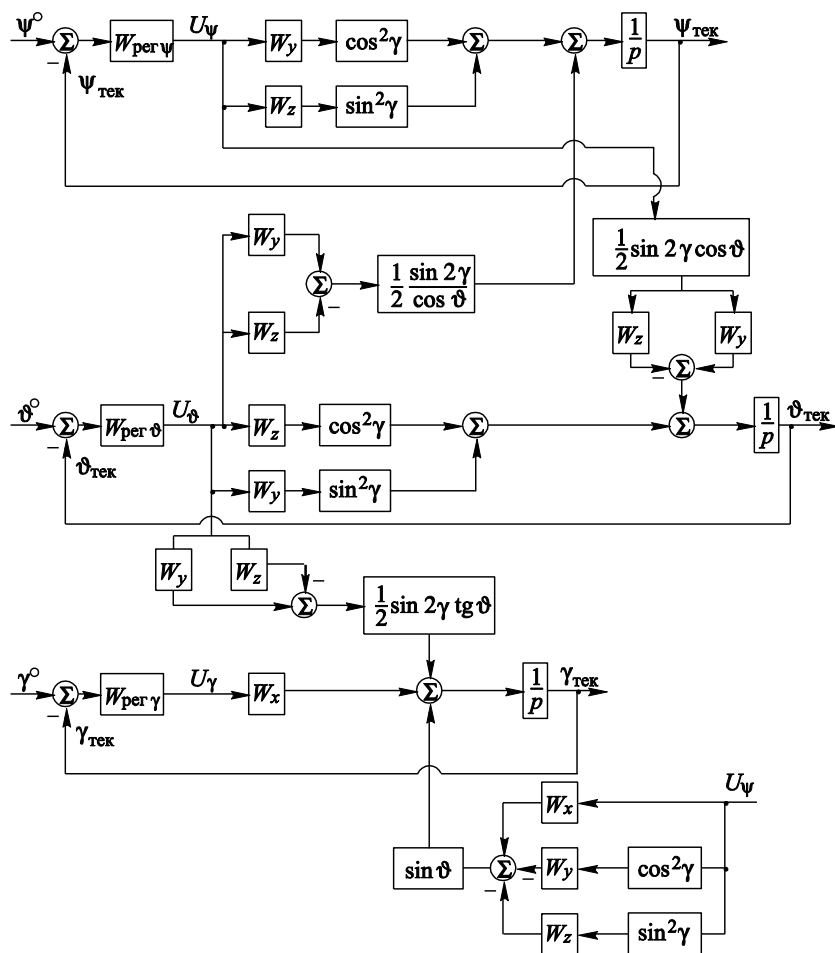


Рис. 2. Структурная схема МСАУ ориентацией НПА с учетом перекрестных связей между каналами

Из вида передаточной матрицы (11) и структурной схемы, представленной на рис. 2, следует, что в случае неодинаковости параметров передаточных функций  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  с ростом углов дифферента и крена МСАУ ориентацией НПА становится *многосвязной* и имеет следующие особенности.

1. С ростом угла крена изменяются параметры диагональных элементов передаточной матрицы (11) системы. Если регуляторы в каналах управления МСАУ не учитывают эти особенности, то при некотором критическом угле крена диагональные элементы матрицы (11) могут становиться неустойчивыми, а МСАУ ориентацией НПА — неработоспособной.

2. С ростом углов наклона увеличивается степень связности между каналами. С ростом угла дифферента усиливается влияние управления курсом на канал управления креном, а с ростом угла крена —



влияние остальных перекрестных связей между каналами, что ухудшает точность и качество переходных процессов системы, а также может отрицательно сказаться на ее устойчивости.

При исследовании устойчивости МСАУ рассматривают случаи слабых и сильных перекрестных связей [11], [12]. В рамках данной работы будем считать, что параметры регуляторов каналов подобраны таким образом, что перекрестные связи в МСАУ слабые.

Согласно работе [12], математическим условием слабости перекрестных связей передаточной матрицы (11) является выполнение хотя бы одного из следующих двух условий:

$$|1 + W_{ii}(j\omega)| > \theta_i(\omega) |W_{ii}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in [0, \infty), \quad \forall i; \quad (12)$$

$$|1 + W_{ii}(j\omega)| > k_i(\omega) |W_{ii}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in [0, \infty), \quad \forall i, \quad (13)$$

где  $\theta_i(\omega) = \frac{\sum_{k \neq i}^3 |W_{ki}(j\omega)|}{|W_{ii}(j\omega)|}$  — функция связности МСАУ по входам

( $W_{ki}(j\omega)$  — частотная передаточная функция матрицы (11), находя-

щаяся на  $k$ -й строке в  $i$ -м столбце);  $k_i(\omega) = \frac{\sum_{k \neq i}^3 |W_{ik}(j\omega)|}{|W_{ii}(j\omega)|}$  — функция

связности МСАУ по выходам.

В соответствии с достаточным критерием устойчивости Найквиста для многомерных систем управления анализ устойчивости МСАУ ориентацией НПА предлагается провести в два этапа:

1) анализ устойчивости отдельных каналов при максимальных рабочих углах крена;

2) проверка условий слабости перекрестных связей МСАУ (12), (13) при максимальных рабочих углах дифферента и крена.

Следовательно, устойчивость отдельных каналов НПА при малых углах дифферента и крена не гарантирует устойчивости СУ с ростом углов наклона и возможны критические углы, при которых система станет неработоспособной. Это может быть вызвано либо потерей устойчивости основных каналов управления курсом и дифферентом (элементы  $W_{11}$ ,  $W_{22}$  матрицы (11)), либо нарушением условий (12), (13) вследствие усиления влияния перекрестных связей.

**Компенсирующий алгоритм.** Для того чтобы решить проблему взаимовлияния каналов МСАУ ориентацией НПА, предлагается привести матрицу (11) к автономному виду:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{\text{тек}} \\ \Theta_{\text{тек}} \\ \gamma_{\text{тек}} \end{bmatrix} = \frac{1}{P} \begin{bmatrix} W_y W_{\text{пер } \psi} & 0 & 0 \\ 0 & W_z W_{\text{пер } \vartheta} & 0 \\ 0 & 0 & W_x W_{\text{пер } \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\psi} \\ \varepsilon_{\vartheta} \\ \varepsilon_{\gamma} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Как следует из (11), это возможно, если передаточные функции каналов, заключенных между матрицами  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{P}^{-1}$  (см. рис. 1), будут одинаковы, т. е.  $W_x = W_y = W_z$ . Данное условие может быть выполнено при проектировании симметричного НПА с симметричным движительно-рулевым комплексом. Под *симметричностью* подразумевается одинаковость параметров аппарата (гидродинамических характеристик, моментов инерции и др.), а также нулевая метацентрическая высота) и его движительно-рулевого комплекса для каждого канала углового движения НПА вокруг связанных с ним осей. В качестве примера такого НПА, управляемого при больших углах наклона, можно рассмотреть аппарат V8 компании Ocean Modules. Однако такой подход приводит к конструктивным и функциональным ограничениям, что для решения некоторых задач может оказаться неприемлемым.

Другим способом приведения передаточной матрицы (11) к автономному виду может быть введение компенсирующего алгоритма. Для этого предлагается ввести корректирующие звенья в закон управления (8). После соответствующих преобразований получим алгоритм, обеспечивающий условия автономности СУ:

$$\begin{aligned} \omega_x^\circ &= \dot{\gamma}^\circ + \psi^\circ \sin \Theta_{\text{тек}} \frac{W_y}{W_x}, \\ \omega_y^\circ &= \dot{\Theta}^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} \frac{W_z}{W_y} + \psi^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} \cos \Theta_{\text{тек}}, \\ \omega_z^\circ &= \dot{\Theta}^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} - \psi^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} \cos \Theta_{\text{тек}} \frac{W_y}{W_z}. \end{aligned} \quad (15)$$

При таком законе управления ориентацией НПА взаимовлияние между каналами отсутствует, а устойчивость сепаратных каналов при нулевых углах наклона обеспечивает устойчивость системы ориентации при любых углах  $\Theta$  и  $\gamma$ .

Следует отметить, что для реализации закона управления (15) корректирующие элементы должны представлять собой интегро-дифференцирующие звенья с полиномами больших степеней в числителях и знаменателях, реализация которых на практике затруднительна, так как требует решения задачи идентификации и учета изменения параметров входящих в (15) передаточных функций. Ввиду

этой особенности закона управления рассмотрим *способы упрощения компенсирующего алгоритма*. Для этого проанализируем работу системы в установившемся режиме.

Анализ степени связности между каналами для установившегося режима проведем по методу Бристоля, который заключается в вычислении матрицы  $\Lambda$  относительных коэффициентов  $\lambda_{ij}$  чувствительности в соответствии со следующим уравнением [11]:

$$\lambda_{ij} = W_{ij}(0)[\mathbf{W}^{-T}(0)]_{ij}, \quad (16)$$

$$\mathbf{W}^{-T} = \begin{bmatrix} \frac{W_z \cos^2 \gamma + W_y \sin^2 \gamma}{W_{\text{per } \psi} W_z W_y} & -\frac{\sin 2\gamma \cos \vartheta (W_y - W_z)}{2W_{\text{per } \vartheta} W_y W_z} & \frac{\sin \vartheta (W_z \cos^2 \gamma + W_y \sin^2 \gamma W_x - W_y W_z)}{W_x W_y W_z W_{\text{per } \gamma}} \\ -\frac{\sin 2\gamma (W_y - W_z)}{2 \cos \vartheta W_{\text{per } \psi} W_z W_y} & \frac{W_y \cos^2 \gamma + W_z \sin^2 \gamma}{2W_{\text{per } \vartheta} W_y W_z} & \frac{-\text{tg } \vartheta \sin 2\gamma (W_y - W_z)}{W_y W_z W_{\text{per } \gamma}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{W_x W_{\text{per } \gamma}} \end{bmatrix},$$

где  $W_{ij}$  — элементы передаточной матрицы (11), находящиеся на  $i$ -й строке в  $j$ -м столбце;  $[\mathbf{W}^{-T}(0)]_{ij}$  — элементы обратной транспонированной матрицы.

Полученная в соответствии с (16) матрица относительных коэффициентов чувствительности может быть записана следующим образом:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{4} \sin^2 2\gamma \frac{(K_y - K_z)^2}{K_y K_z} & -\frac{1}{4} \sin^2 2\gamma \frac{(K_y - K_z)^2}{K_y K_z} & 0 \\ -\frac{1}{4} \sin^2 2\gamma \frac{(K_y - K_z)^2}{K_y K_z} & 1 + \frac{1}{4} \sin^2 2\gamma \frac{(K_y - K_z)^2}{K_y K_z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где  $K_y$ ,  $K_z$  — коэффициенты усиления передаточных функций  $W_y$ ,  $W_z$  соответственно.

Чем меньше недиагональные элементы матрицы (17), тем меньше связность между каналами в установившемся режиме. Приведем матрицу (17) к диагональному виду, используя следующий закон управления:

$$\begin{aligned} \omega_x^\circ &= \dot{\gamma}^\circ + \psi^\circ \sin \vartheta_{\text{тек}} \frac{K_y}{K_x}, \\ \omega_y^\circ &= \dot{\vartheta}^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} \frac{K_z}{K_y} + \psi^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} \cos \vartheta_{\text{тек}}, \\ \omega_z^\circ &= \dot{\vartheta}^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} - \psi^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} \cos \vartheta_{\text{тек}} \frac{K_y}{K_z}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $K_x$  — коэффициент усиления передаточной функции  $W_x$ .

Упрощенный корректирующий алгоритм (18) представляет собой отношения коэффициентов усиления передаточных функций  $W_x(0)$ ,  $W_y(0)$ ,  $W_z(0)$  каналов в соответствии с законом управления (15). Применение закона управления (18) не позволит полностью компенсировать динамическую ошибку от взаимовлияния между каналами, но повысит точность СУ в установившемся режиме.

**Результаты моделирования.** В предыдущих расчетах математическая модель НПА была аппроксимирована аperiodическим звеном второго порядка, но для моделирования использована нелинейная математическая модель, описываемая уравнениями (1), (2), (6). В качестве данных для моделирования используются параметры НПА «АКВА-МО», которые получены в работе [10] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры НПА «АКВА-МО»

$i$	$T_{дв i}, c$	$K_{дв i},$ Н·м/В	$J_i + \lambda_{jj},$ кг·м <sup>2</sup>	$C_{\omega, 1},$ кг·м <sup>2</sup>	$C_{\omega, 2},$ кг·м <sup>2</sup> /с	$K_{ПА i},$ с/(кг·м <sup>2</sup> )	$T_{ПА i}, c$	$\omega_i^*,$ с <sup>-1</sup>
$x$	0,15	33	55	1200	80	0,0125	0,687	0
$y$	0,10	35	280		120	0,0083	2,300	
$z$	0,20	50	323		110	0,0091	2,936	

В качестве закона управления выбран пропорциональный регулятор с демпфирующей скоростной связью. На начальном этапе проводились расчет и настройка СУ отдельно для каждого сепаратного канала управления курсом, креном и дифферентом. Полученные коэффициенты усиления и передаточные функции каналов приведены в табл. 2, а результаты моделирования их работы — на рис. 3, а–в.

Работа СУ моделировалась при одновременных задающих воздействиях по каждому из каналов углового движения НПА. Полученные переходные процессы в системе представлены на рис. 4, а, на котором видно, что с ростом углов наклона повышается колебатель-

ность каналов курса и крена, увеличивается время переходных процессов в системе, повышается влияние управления по курсу на канал управления по крену.

Таблица 2

Передаточные функции и параметры каналов управления ориентацией НПА «АКВА-МО»

$i$	$K_{o.c.i}$	$W_i$ при $\omega_i^* = 0$	$W_{пер}$
$x$	6,30	$\frac{0,1146}{0,0285p^2 + 0,233p + 1}$	$K_\gamma = 0,292$
$y$	37,25	$\frac{0,0246}{0,0195p^2 + 0,2p + 1}$	$K_\psi = 1,650$
$z$	18,0	$\frac{0,0495}{0,064p^2 + 0,34p + 1}$	$K_\vartheta = 0,438$

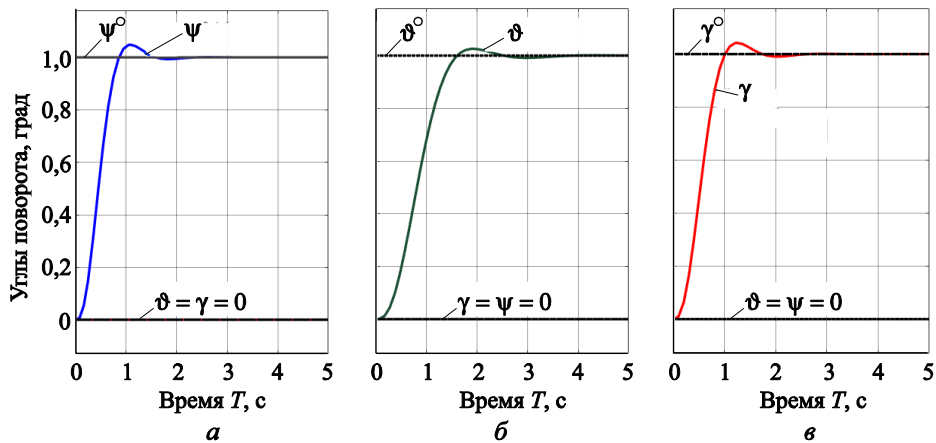


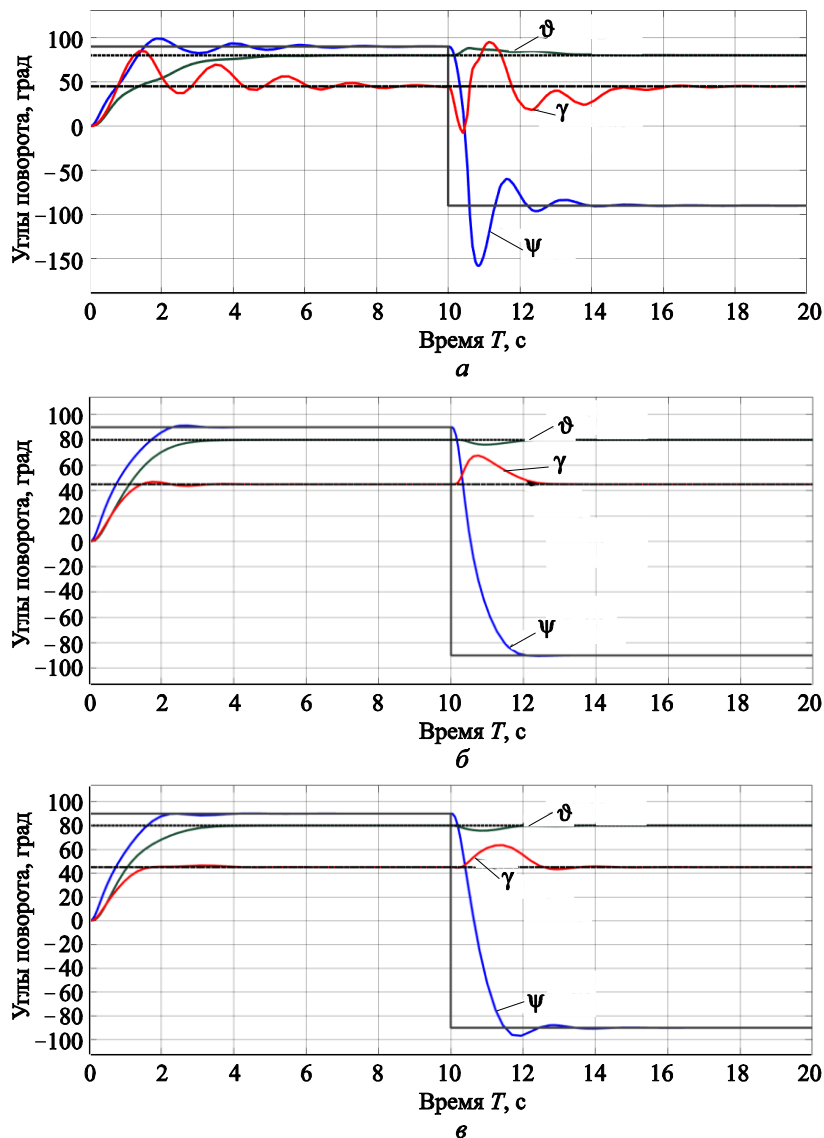
Рис. 3. Переходные процессы в системе ориентации НПА в отдельных каналах управления курсом (а), дифферентом (б) и креном (в)

Для решения указанных проблем был использован закон полной компенсации (15), который для рассматриваемой СУ имеет следующий вид:

$$\omega_x^{\circ} = \dot{\gamma}^{\circ} + \dot{\psi}^{\circ} \sin \vartheta_{тек} \frac{0,21466(0,0285p^2 + 0,233p + 1)}{0,0195p^2 + 0,2p + 1},$$

$$\omega_y^{\circ} = \dot{\vartheta}^{\circ} \sin \gamma_{тек} \frac{2,0122(0,0195p^2 + 0,2p + 1)}{0,064p^2 + 0,34p + 1} + \dot{\psi}^{\circ} \cos \gamma_{тек} \cos \vartheta_{тек}, \quad (19)$$

$$\omega_z^\circ = \dot{\vartheta}^\circ \cos \gamma_{\text{тек}} - \dot{\psi}^\circ \sin \gamma_{\text{тек}} \cos \vartheta_{\text{тек}} \frac{0,49697(0,064p^2 + 0,34p + 1)}{0,0195p^2 + 0,2p + 1}. \quad (19)$$



**Рис. 4.** Переходные процессы в системе ориентации НПА при совместной работе контуров без компенсации (а), с полной (б) и частичной (в) компенсацией ( $\psi^\circ = 90^\circ$  (или  $-90^\circ$  при  $T = 10$  с),  $\vartheta^\circ = 80^\circ$ ,  $\gamma^\circ = 45^\circ$ )

Результаты работы МСАУ с законом регулирования (19) при совместной работе всех каналов управления движением представлены на рис. 4, б. Численные значения таких показателей качества си-

стемы, как время  $t_{п.п}$  переходного процесса, перерегулирование  $\sigma_i$  и динамическая ошибка  $\Delta_{дин}$  при совместной работе контуров систем с компенсацией и без компенсации приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнительная характеристика переходных процессов МСАУ по углам ориентации НПА для различных структур и режимов работы**

Работа контуров	$t_{п.п}, c$			$\sigma_i, \%$			$\Delta_{дин}, град$	
	$\psi$	$\vartheta$	$\gamma$	$\psi$	$\vartheta$	$\gamma$	$\vartheta$	$\gamma$
Сепаратная	0,77	1,46	0,94	5	3	5	0	0
Совместная:								
без компенсации	2,80	4,00	6,70	9	0	89	8,0	50,0
с полной компенсацией	1,80	2,45	2,10	2,2	0	4,5	-3,8	23,0
с частичной компенсацией	1,85	2,70	1,50	0	0	3,2	-5,0	18,5

По результатам моделирования и данным, приведенным в табл. 3, можно сделать вывод, что после введения полной компенсации в системе достигается частичная автономность каналов, уменьшается колебательность, повышается качество переходных процессов по сравнению с работой СУ без компенсации.

Однако применение закона управления (19) не дает возможность полностью компенсировать влияние перекрестных связей в системе. Это связано с неточностью определения передаточных функций  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  алгоритма управления. Причина получения неточных значений  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  заключается в том, что для расчета и синтеза системы принята модель НПА, представляющая собой апериодическое звено второго порядка, линеаризованное для наихудшего с точки зрения устойчивости случая, когда  $\omega_i^* = 0$ , а для моделирования используется нелинейная математическая модель.

Упрощенный закон компенсации (18) может быть описан следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \omega_x^\circ &= \dot{\gamma}^\circ + 0,21466 \dot{\psi}^\circ \sin \vartheta_{тек}, \\ \omega_y^\circ &= 2,0122 \dot{\vartheta}^\circ \sin \gamma_{тек} + \dot{\psi}^\circ \cos \gamma_{тек} \cos \vartheta_{тек}, \\ \omega_z^\circ &= \dot{\vartheta}^\circ \cos \gamma_{тек} - 0,49697 \dot{\psi}^\circ \sin \gamma_{тек} \cos \vartheta_{тек}. \end{aligned} \quad (20)$$

Моделирование работы алгоритма (20) представлено на рис. 4, в, а значения показателей качества процессов в системе приведены в табл. 3. Полученные переходные процессы существенно лучше, чем в системе без компенсации и сопоставимы по качеству с работой си-

стемы с полной компенсацией, но при этом алгоритм (20) прост в реализации.

**Заключение.** В работе получена передаточная матрица многомерной СУ ориентацией НПА в пространстве для традиционного подхода к управлению с разделением на сепаратные каналы, не теряющая общности для различных подходов к построению регуляторов сепаратных каналов СУ. По результатам анализа полученной передаточной матрицы можно сделать следующие выводы:

1) с увеличением угла крена изменяются параметры основных каналов движения НПА, и при определенных углах СУ может стать неустойчивой;

2) с увеличением углов дифферента и крена возрастает влияние перекрестных связей между каналами, ухудшается качество переходных процессов при управлении ориентацией НПА.

Таким образом, в работе показано, что применение традиционного подхода к построению СУ ориентацией НПА имеет ограничения. Предложенный в работе алгоритм компенсации (15) и его упрощенная форма (18) позволяют расширить диапазоны значений рабочих углов и улучшить качество работы СУ угловой ориентацией существующих НПА без значительной переработки структуры системы.

Интерес представляют учет нелинейностей в СУ, ее чувствительности к изменениям параметров, разработка алгоритмов подстройки коэффициентов в законах компенсации и управление НПА при угле дифферента, равном  $90^\circ$ . Рассмотрение обозначенных вопросов планируется в дальнейшем.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300». *Подводные исследования и робототехника*, 2012, № 1 (13), с. 36–46.
- [2] Ferreira V.M., Jouffroy J. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down. *Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE*. Hampton Roads, USA, 2012, pp. 1-7.
- [3] Ribas D., Palomeras N., Ridao P., Carreras M., Mallios A. Girona 500 AUV: From Survey to Intervention. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 46–53.
- [4] Bingham B. *Precision Autonomous Underwater Navigation*. Ph. D. dissertation. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, 2003, 185 p.
- [5] Cruz N.A., Matos A.C., Almeida R.M. TriMARES — a Hybrid AUV/ROV for Dam Inspection. *Proceedings of OCEANS 2011 MTS/IEEE*, Waikoloa, USA, 2011, pp. 1–7.
- [6] Гамазов Н.И., Гладкова О.И., Егоров С.А. Особенности построения и экспериментальная отработка информационно-управляющей системы гибридного телеуправляемого подводного аппарата. *Материалы 6-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПМО-6)*. Владивосток, Дальнаука, 2015, с. 401–405.



- [7] Егоров С.А., Куценко А.С. Особенности построения системы управления угловой ориентацией телеуправляемого подводного аппарата. *Современные методы и средства океанологических исследований. Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2.* Москва, 2007, с. 127-129.
- [8] Алексеев К.Б. *Экстенсивное управление ориентацией космических летательных аппаратов.* Москва, Машиностроение, 1977, 121 с.
- [9] Fossen T.I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles.* John Wiley & Sons Ltd., 1994, 480 p.
- [10] Егоров С.А. *Управление движением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения.* Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2002, 361 с.
- [11] Зырьянов Г.В. *Системы управления многосвязными объектами.* Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2010, 112 с.
- [12] Соболев О.С. *Методы исследования линейных многосвязных систем.* Москва, Энергоатомиздат, 1985, 120 с.

Статья поступила в редакцию 18.09.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лямина Е.А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1745>

**Лямина Екатерина Андреевна** — ассистент кафедры «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ea9055111391@gmail.com

**Егоров Сергей Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sa\_egorov@mail.ru

## Features of constructing a control system for underwater vehicle angular orientation at large angles of inclination

© E.A. Lyamina, S.A. Egorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The scope of uninhabited underwater vehicles is increasing, problems appear that require control of vehicles at large angles of inclination. At the same time, the applicability of traditional approaches to this problem solution has been poorly studied. The construction of a system for underwater vehicle position control at the large angles of inclination is considered on the basis of the traditional method of controlling the orientation in the Euler—Krylov angles. In the course of the research a general form of the transfer matrix of apparatus angular orientation control system is derived. It is shown that as the angles of inclination increase, the transfer matrix of the system becomes multiconnected. Algorithms for compensation of appearing perturbations are proposed. The obtained results are checked by the mathematical modeling techniques. The compensation algorithms proposed in the work allow expanding the ranges of working angle values and improving the operation quality of the angular orientation control system of existing uninhabited underwater vehicles without significant redesign of its structure.*

**Keywords:** large angles of inclination, trim, position control, underwater vehicle, compensation of cross-links

### REFERENCES

- [1] Kostenko V.V., Mikhaylov D.N. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika — Underwater Investigations and Robotics*, 2012, no. 1 (13), pp. 36–46.
- [2] Ferreira B.M., Jouffroy J. *Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE*, Hampton Roads, USA, 2012, pp. 1–7.
- [3] Ribas D., Palomeras N., Ridaio P., Carreras M., Mallios A. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 46–53.
- [4] Bingham B. *Precision Autonomous Underwater Navigation*. Ph.D. dissertation. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, 2003, 185 p.
- [5] Cruz N.A., Matos A.C., Almeida R.M. *Proceedings of OCEANS 2011 MTS/IEEE*, Waikoloa, USA, 2011, pp. 1–7.
- [6] Gamazov N.I., Gladkova O.I., Egorov S.A. Osobennosti postroeniya i eksperimentalnaya otrabotka informatsionno-upravlyaushchey sistemy gibridnogo teleupravlyaemogo apparata [Features of construction and experimental development of the information-control system of a hybrid remote controlled underwater vehicle]. *Materialy 6-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Tekhnicheskije problemy osvoeniya mirovogo okeana” (TPOMO-6)* [Proceedings of the 6<sup>th</sup> National scientific-technical conference “Technical problems of the world ocean development” (TPOMO-6)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2015, pp. 401–405.
- [7] Egorov S.A., Kutsenko A.S. Osobennosti postroeniya sistemy upravleniya uglovoy orientatsiey teleupravlyaemogo podvodnogo apparata [Features of construction of a control system for the angular orientation of a remote controlled underwater vehicle]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy”*. Ch. 2 [Proceedings of the X International scientific-technical conference “Modern methods and means of oceanological research. Part 2]. Moscow, 2007, pp. 127–129.

- [8] Alekseev K.B. *Ekstensivnoe upravlenie orientatsiy kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Extensive control of the spacecraft orientation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 121 p.
- [9] Fossen T.I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, Ltd., 1994, 480 p.
- [10] Egorov S.A. *Upravlenie dvizheniem teleupravlyаемого podvodnogo apparata v rezhime sovместnogo s nositelem dvizheniya*. Diss. cand. tekhn. nauk [The control of the remote-controlled underwater vehicle motion in the mode of joint motion with the carrier. Cand. eng. sc. diss.]. Moscow, 2002, 361 p.
- [11] Zyryanov G.V. *Sistemy upravleniya mnogovyaznymi obyektami* [Control systems for multi-loop controlled objects]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2010, 112 p.
- [12] Sobolev O.S. *Metody issledovaniya lineynykh mnogovyaznykh sistem* [Methods for investigating linear multi-loop controlled systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 120 p.

**Lyamina E.A.**, Assistant Lecturer, Department of Underwater Robots and Apparatus, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: ea9055111391@gmail.com

**Egorov S.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Underwater Robots and Apparatus, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sa\_egorov@mail.ru