

Л. А. МАРТЫНОВА, М. Б. РОЗЕНГАУЗ

ПОДХОД К РЕКОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассмотрена задача реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата в случае возникновения отказов его органов управления и исполнительных устройств, обеспечивающих движение и маневрирование аппарата. Проанализированы особенности разнородных, работающих на различных физических принципах исполнительных устройств. Сформирована нелинейная математическая модель движения аппарата, учитывающая особенность морской среды, связанную с повышенной вязкостью. Нелинейность не позволяет использовать традиционные подходы к решению задачи реконфигурации, применяемые к летательным аппаратам.

Предложен подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата, который заключается в предварительном анализе условий применения разнородных исполнительных устройств в зависимости от скорости движения аппарата и его маневра. Выбор альтернативных работоспособных исполнительных устройств обусловлен необходимостью обеспечить максимально возможную степень компенсации сил и моментов, создаваемых отказавшим устройством или его приводом.

Получены результаты реконфигурации системы управления движением подводного аппарата в случае отказа привода, управляющего горизонтальными носовыми рулями при выполнении маневра заглужения на разгонном участке траектории. В качестве дублирующих рассмотрены вертикальные подруливающие устройства, определены их параметры, обеспечивающие компенсацию сил и моментов отказавших заклинивших носовых горизонтальных рулей. Путем математического имитационного моделирования процесса заглужения подводного аппарата получены сравнительные количественные оценки результатов реконфигурации системы управления движением аппарата.

Дальнейшие исследования связаны с применением предложенного подхода для других систем автономных необитаемых подводных аппаратов.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система управления движением, реконфигурация.

Мартынова Любовь Александровна. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор» (С.-Петербург).

Розенгауз Михаил Борисович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор».

Введение

Совершенствование технологий в области робототехники привело к возможности создания автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), способных решать сложные задачи, связанные, например, с перемещением на большие расстояния в течение длительного времени [1]. При многонедельном нахождении АНПА в автономном плавании возможны отказы органов управления и исполнительных устройств, приводящие к потере управляемости и к нарушению навигации АНПА [2]. В связи с этим задача реконфигурации системы управления (СУ) АНПА является актуальной. Под реконфигурацией в данном случае понимается целенаправленный процесс минимального снижения эффективности использования АНПА при выходе из строя элементов его системы управления.

Наиболее критичным является отказ органов управления или исполнительных устройств маршевого движительно-рулевого комплекса, обеспечивающего движение и маневрирование АНПА. Отказ органов управления может привести к заклиниванию используемых исполнительных устройств в положении, способствующем сваливанию аппарата в штопор и катастрофе.

В случае возникновения отказа существенно нарушается традиционное для текущих внешних условий управление, так называемый стереотип управления АНПА. И если в обитаемом подводном объекте решение задачи реконфигурации подразумевает участие лица, принимающего решение (ЛПР), то в АНПА вся ответственность по приему решения ложится на алгоритмы, реализованные в системе управления АНПА. В связи с этим остро стоит проблема формирования алгоритмов управления движением АНПА, способных в любой ситуации отказа минимизировать риск потери аппарата. В связи с этим реконфигурация СУ АНПА в случае отказа органа управления или исполнительного устройства и замена его на дублирующее означает максимально возможное сохранение эффективности, т.е. стереотипа, управления [3].

В настоящее время имеется достаточно большое количество публикаций, посвященных реконфигурации системы управления подвижных объектов, однако в подавляющем большинстве они посвящены летательным аппаратам (ЛА). Выбор альтернативных средств для реконфигурации основан на анализе рабочей поверхности однородных исполнительных устройств ЛА (элеронов, стабилизаторов, рулей высоты, руля направления, интерцепторов) и представлении математической модели ЛА в виде линейных уравнений [3–9], что позволяло использовать для реконфигурации операции линейной алгебры с матрицами [3–10]. В противоположность ЛА АНПА предназначен для применения в водной среде, обладающей по сравнению с воздушной повышенной вязкостью, с чем связаны особенности движения аппарата и его управления. Еще одним отличием системы управления АНПА от ЛА является использование при реконфигурации в качестве дублирующих разнородных исполнительных устройств, работа которых основана на различных физических принципах. Например, в АНПА для управления движением наряду с рулями используются также вертикальные и горизонтальные подруливающие устройства (ВПУ, ГПУ), уравнительно-дифференциальные системы. Третьей особенностью является то, что все исполнительные устройства ЛА характеризуются рабочей поверхностью и используются только на скоростях, способных поддерживать аппарат в режиме полета. У АНПА этот диапазон намного шире, в частности туда входит маневрирование по

глубине с практически нулевой продольной скоростью и с использованием не только рабочих поверхностей, но и, например, уравнильно-дифференциальных цистерн, регулирующих дифферент и плавучесть аппарата.

В исследованиях [11–14], посвященных реконфигурации системы управления подводных аппаратов, основное внимание уделено применению однородных исполнительных устройств (подруливающих устройств [12] или маршевых движителей [13]) в качестве дублирующих. В [14] АНПА моделируется как линейная многопараметрическая система, что в общем случае накладывает существенные ограничения на реконфигурацию СУ АНПА.

В ограниченных публикациях описываемая реконфигурация систем управления обитаемых морских подводных объектов подразумевает участие ЛППР, что не подходит для АНПА. В частности, при выборе того или иного действия ЛППР опирается на собственный опыт в зависимости от текущей обстановки, положения аппарата, скорости его движения и используемых исполнительных устройств. В системе управления АНПА все решают заранее реализованные алгоритмы. Именно формирование этих алгоритмов и рассматривается в настоящей работе.

1. Постановка задачи

На данном этапе исследований полагаем, что с помощью диагностирования выявлен отказ органов управления или исполнительных устройств АНПА. Кроме того, исполнительные устройства считаем избыточными, что является необходимым условием для реконфигурации.

Введем связанную систему координат $Ox_1y_1z_1$. Ее начало O совпадает с центром тяжести (ЦТ) полного подводного объема АНПА. Плоскость Ox_1y_1 совпадает с диаметральной плоскостью (плоскостью симметрии). Ось Ox_1 (продольная) лежит в плоскости Ox_1y_1 и направлена в нос. Ось Oy_1 (нормальная) лежит в плоскости Ox_1y_1 и направлена вверх, перпендикулярно оси Ox_1 . Ось Oz_1 (боковая) перпендикулярна плоскости Ox_1y_1 и направлена на правый борт.

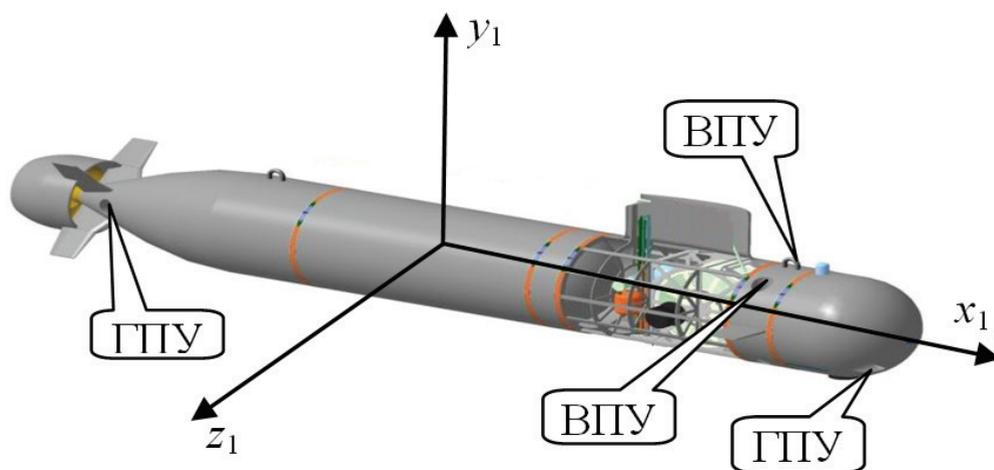


Рис. 1. Ориентация связанной системы координат и положение ВПУ и ГПУ (вид АНПА заимствован из [1])

Представим модель исправного АНПА в матричном виде [9, 10]

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \quad (1)$$

где x – вектор состояния АНПА до отказа размерности m ; u – вектор управления АНПА размерности n ; \mathbf{A} – матрица собственной динамики АНПА, число столбцов которой равно m ; \mathbf{B} – матрица эффективности управления АНПА, отражающая вклад параметров управления в конечный результат работы системы управления, число столбцов которой равно n .

В общем случае в АНПА для управления движением используют следующие исполнительные устройства: один или несколько маршевых движителей для поступательного движения аппарата вдоль оси x_1 , рули кормовые и носовые для маневрирования на скорости, ВПУ и ГПУ для маневрирования на практически нулевой скорости или при изменении углов крена и дифферента, уравнительно-дифферентные цистерны для формирования дифферента как при поступательном движении, так и при практически нулевой скорости движения.

Состояние x и управление u АНПА опишем векторами вида

$$x = [v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T, \quad (2)$$

$$u = [n_{MD}^2 \quad \delta_R \quad P_{UDS} \quad n_{PU}^2], \quad (3)$$

где v_x, v_y, v_z – проекции линейных скоростей на оси связанной с объектом основной подвижной системы координат, м/с; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловых скоростей на оси связанной с объектом системы координат, рад/с²; n_{MD} – количество оборотов в секунду маршевого движителя (МД); δ_R – углы перекладки рулей – различные в общем случае, рад; P_{UDS} – плавучесть, создаваемая носовой и кормовой уравнительно-дифферентными цистернами, Н; n_{PU} – число оборотов в секунду подруливающих устройств.

Эффективность управления АНПА опишем матрицей вида [15, 16]

$$B = \begin{bmatrix} B_{MD}^F & B_R^F & B_{UDS}^F & B_{PU}^F \\ B_{MD}^M & B_R^M & B_{UDS}^M & B_{PU}^M \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где B_j^F и B_j^M – матрицы сил и моментов, создаваемые каждым j -м исполнительным устройством.

Для формирования матрицы \mathbf{A} выразим проекции производных скоростей v и ω на оси связанной системы координат через гидродинамические составляющие, описываемые известными формулами гидромеханики [15, 16]:

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \frac{c_x \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}}}{\rho V (1 + k_{11})}, \\ \dot{v}_y &= \frac{c_y \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}}}{\rho V (1 + k_{22})}, \\ \dot{v}_z &= \frac{c_z \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}}}{\rho V (1 + k_{33})}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_x = \frac{m_x \frac{\rho v^2}{2} V - hD \sin \theta \cos \psi - h \cdot P_0 \sin \theta \cos \psi - h \cdot P_{ob} \sin \theta \cos \psi}{\rho I_x (1 + k_{44})},$$

$$\dot{\omega}_y = \frac{m_y \frac{\rho v^2}{2} V}{\rho I_y (1 + k_{55})}, \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{m_z \frac{\rho v^2}{2} V - hD \sin \psi - hP_0 \sin \psi - hP_{ob} \sin \psi}{\rho I_z (1 + k_{66})},$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; v – скорость АНПА, м/с; V – полное подводное объемное водоизмещение АНПА, м³; $k_{11}, k_{22}, k_{33}, k_{44}, k_{55}, k_{66}$ – коэффициенты присоединенных масс и моментов инерции относительно главных осей координат; c_x, c_y, c_z – безразмерные коэффициенты; m_x, m_y, m_z – позиционные коэффициенты моментов в связанной системе координат; I_x, I_y, I_z – моменты инерции массы относительно главных осей, проходящих через центр тяжести полного подводного объема, Н·м·с²; P_0 – начальная (эксплуатационная) избыточная плавучесть АНПА, Н; P_{ob} – плавучесть, возникающая в результате обжатия корпуса АНПА, Н; h – метацентрическая высота, отнесенная к полному подводному объему, м; D – сила веса (весовое водоизмещение), равная силе плавучести: $D = \gamma V$, где γ – удельный вес воды, Н/м³.

Пусть в некоторый момент времени произошел отказ органа управления или исполнительного устройства АНПА, тогда его модель примет вид [10]

$$\dot{x}_f = \mathbf{A}x_f + \mathbf{B}_f u_f, \quad (7)$$

где x_f – вектор состояния АНПА после отказа; \mathbf{B}_f – матрица эффективности управления АНПА после отказа; u_f – вектор управления АНПА после отказа.

Представим матрицу \mathbf{B} , как это предложено в [4], в виде

$$\mathbf{B}_f = \mathbf{B} \cdot \mathbf{F}, \quad (8)$$

где \mathbf{F} – матрица размерности $n \times n$, представляемая в виде диагональной матрицы с единицами на главной диагонали и нулями в местах, характеризующих отказ органа управления или исполнительного устройства [10], и равная

$$\mathbf{F} = \text{diag}([f_1, f_2, \dots, f_n]), \text{ где } f_j = 1 - \text{отказа нет}, f_j = 0 - \text{отказ есть}; j = 1, \dots, n.$$

В случае исправного состояния всех органов управления и исполнительных устройств матрица \mathbf{F} – единичная.

Необходимо найти такое управление u_f , которое бы после отказа АНПА сохраняло устойчивость и управляемость:

$$u_f = u + u_k. \quad (9)$$

2. Предлагаемый подход к реконфигурации СУ АНПА

В [10] показано, что для нахождения управления u_f необходимо с учетом оставшихся после отказа исполнительных устройств определить такую матрицу \mathbf{B}_k , которая обеспечивала бы выполнение условия

$$\mathbf{B}_f = \mathbf{B} + \mathbf{B}_k. \quad (10)$$

Поскольку уравнения сил (5) и моментов (6) являются нелинейными из-за учета присоединенных масс, гидродинамических сил и моментов, то запись матрицы \mathbf{A} в явном виде затруднительна. В связи с этим, а также с учетом того, что дублирующие исполнительные устройства являются разнородными и создаваемые ими силы и моменты описываются выражениями (5)–(6), невозможно использовать для реконфигурации СУ АНПА методы, разработанные для ЛА [3–10].

По этой причине в работе предложен альтернативный подход к реконфигурации СУ АНПА в случае отказа органов управления или исполнительных устройств. Подход основан на анализе сил и моментов, возникающих в результате работы разнородных исполнительных устройств, обеспечивающих движение АНПА с различной скоростью и его маневрирование. После определения сил и моментов, создаваемых каждым из исполнительных устройств при определенных скоростях движения АНПА, процесс реконфигурации СУ АНПА можно свести к простому перебору всех возможных вариантов замены отказавшего исполнительного устройства дублирующими. В результате из множества дублирующих исполнительных устройств выбирается устройство, создающее силы и моменты, максимально близкие тем, которые могли бы быть созданы исполнительным устройством на текущей скорости движения АНПА с учетом углов атаки и дрейфа. При этом предполагается одновременное компенсирование дополнительных сил и моментов, возникающих в результате отказа органа управления или исполнительного устройства, например заклинивания рулей. Такой подход к реконфигурации позволяет сохранять стереотип управления АНПА. Условие выбора исполнительного устройства представим в виде

$$\begin{cases} \Delta F_i = \left| F_{iDUB} - (F_{iOTK} + F_{iOTK}^*) \right| \rightarrow \min \\ \Delta M_i = \left| M_{iDUB} - (M_{iOTK} + M_{iOTK}^*) \right| \rightarrow \min \end{cases}, \quad (11)$$

где ΔF_i – невязка сил, действующих на АНПА вдоль осей x_1, y_1, z_1 ; ΔM_i – невязка вращающих моментов вокруг осей x_1, y_1, z_1 , $i = \{x, y, z\}$; F_{iDUB} , M_{iDUB} – силы и моменты, создаваемые дублирующим исполнительным устройством; F_{iOTK} , M_{iOTK} – силы и моменты, которые создавались бы отказавшим исполнительным устройством; F_{iOTK}^* , M_{iOTK}^* – дополнительные силы и моменты, которые возникают из-за отказа исполнительных устройств.

Использование дублирующих устройств может привести к формированию ранее не существовавших дополнительных сил и моментов. В связи с этим использование метода простого перебора для определения наиболее подходящих дублирующих устройств крайне затратно в вычислительном отношении, так как необходимо, по сути, моделировать весь процесс выполнения маршрутного задания с каждым из

исполнительных устройств. Кроме того, при изменении скорости АНПА может оказаться, что уже другое дублирующее устройство будет более подходящим. Переключение с одного исполнительного устройства на другое может негативно повлиять на устойчивость положения АНПА из-за переходных процессов.

В связи с этим предлагается усовершенствовать предложенный выше подход к реконфигурации посредством учета геометрии корпуса проектируемого АНПА и характеристик исполнительных устройств, а также за счет проведения предварительных расчетов сил и моментов, создаваемых всеми дублирующими исполнительными устройствами на различных скоростях движения АНПА. Тогда в случае возникновения отказа выбирается устройство из множества альтернативных, которое наиболее близко по создаваемым силам и моментам к отказавшему с учетом текущей скорости и возможных физических ограничений на амплитуды отклонения рулевых поверхностей, скорости вращения подруливающих устройств и пропускной способности насоса уравнительно-дифференциальной системы (УДС). Затем определяются параметры функционирования выбранного исполнительного устройства.

Зависимости сил и моментов, создаваемых исполнительными устройствами, от скорости движения АНПА вычисляются заранее, затем при возникновении отказа выбирается исполнительное устройство с минимальной невязкой сил и моментов и определяются его параметры.

Таким образом, предложенный подход к реконфигурации заключается в следующем.

На первом (предварительном) этапе готовится априорная информация о силах и моментах, создаваемых на различных скоростях движения АНПА. По результатам расчетов формируется множество исполнительных устройств для каждой скорости движения, которые могут быть использованы при реконфигурации.

На втором этапе при отказе органа управления или исполнительного устройства в зависимости от текущей скорости АНПА выбирается соответствующее множество альтернативных дублирующих исполнительных устройств, а из него – наиболее подходящее по условию минимума невязки, причем не только для текущего момента, но и с прогнозированием дальнейшего изменения скорости движения АНПА. В качестве прогноза можно использовать целевую скорость движения АНПА на этом интервале времени (задается в миссии АНПА). Выбор наиболее подходящего исполнительного устройства может быть осуществлен с помощью «жадного» алгоритма [17]. Одновременно определяются параметры выбранного дублирующего устройства. При замене одного исполнительного устройства на другое следует ожидать, что в общем случае из-за ограничений характеристик дублирующего устройства не будет наблюдаться полного совпадения всех сил и моментов, создаваемых отказавшим исполнительным устройством, и динамика АНПА будет отличаться от динамики, которую могло бы обеспечить отказавшее устройство.

3. Пример применения предложенного подхода

Рассмотрим применение предлагаемого подхода для реконфигурации СУ разрабатываемого АНПА, в состав исполнительных устройств которого входят:

- один маршевый движитель;
- левый и правый носовые рули;

- кормовые рули;
- левое и правое ВПУ и носовое и кормовое ГПУ;
- УДС.

Тогда вектор управления имеет вид:

$$u = \left[n_{MD}^2 \quad \delta_{NGR} \quad \delta_{KR} \quad P_N \quad P_K \quad n_{NGPU}^2 \quad n_{KGPU}^2 \quad n_{LVPU}^2 \quad n_{PVPU}^2 \right], \quad (12)$$

где δ_{KR} – углы перекадки кормовых рулей (КР), различные в общем случае, рад; δ_{NGR} – углы параллельной перекадки носовых горизонтальных рулей (НГР), различные в общем случае, рад; P_N, P_K – плавучесть, создаваемая носовой и кормовой уравнительно-дифферентными цистернами (УДС) соответственно, Н; n_{NGPU}, n_{KGPU} – число оборотов в секунду носового и кормового ГПУ; n_{LVPU}, n_{PVPU} – число оборотов в секунду левого и правого ВПУ. Для простоты параметры рулей вектора u записаны как обобщенные, но в общем случае они могут быть разными: углы перекадки левого и правого НГР, верхнего и нижнего кормовых рулей.

Пусть АНПА выполняют наиболее типовой этап начала маршрутного задания – заглублиение – путем параллельной перекадки НГР [18]. Полагаем, что поступательное движение обеспечивает МД, а компенсирование гидродинамических сил, действующих на корпус АНПА, для устойчивого движения, – КР.

Пусть в процессе погружения АНПА произошел отказ электропривода НГР, в результате чего произошла остановка перемещения НГР в некотором угловом положении.

Элементы матрицы \mathbf{B} , связанные с НГР, будут иметь вид:

$$B_R^F = \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{c_x^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{11})} & \frac{c_x^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{11})} \\ \frac{c_y^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{22})} & \frac{c_y^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{22})} \\ \frac{c_z^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{33})} & \frac{c_z^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{33})} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$B_R^M = \frac{\rho v^2}{2} V \cdot \begin{bmatrix} \frac{m_x^{\delta_{NGR}}}{\rho I_x(1+k_{44})} & \frac{m_x^{\delta_{KR}}}{\rho I_x(1+k_{44})} \\ \frac{m_y^{\delta_{NGR}}}{\rho I_y(1+k_{55})} & \frac{m_y^{\delta_{KR}}}{\rho I_y(1+k_{55})} \\ \frac{m_z^{\delta_{NGR}}}{\rho I_z(1+k_{66})} & \frac{m_z^{\delta_{KR}}}{\rho I_z(1+k_{66})} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

В матрицах (13)–(14) $c_x^{\delta_{NGR}}, c_x^{\delta_{KR}}, c_y^{\delta_{NGR}}, c_y^{\delta_{KR}}, c_z^{\delta_{NGR}}, c_z^{\delta_{KR}}$, рад/с; $m_x^{\delta_{NGR}}, m_x^{\delta_{KR}}, m_y^{\delta_{NGR}}, m_y^{\delta_{KR}}, m_z^{\delta_{NGR}}, m_z^{\delta_{KR}}$, рад/с² – производные гидродинамических характеристик от перекадки НГР и КР.

Элементы матрицы \mathbf{B} , связанные с подруливающими устройствами, имеют вид:

$$B_{PU}^F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_L \rho D_{GV}^2 & a_P \rho D_{GV}^2 \\ a_N \rho D_{GV}^2 & a_K \rho D_{GV}^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где a_N, a_K, a_L, a_P – коэффициенты упора носового и кормового ГПУ, левого и правого ВПУ соответственно, зависящие от шагового отношения и учитывающие падение тяги ВПУ и ГПУ в зависимости от скорости движения АНПА, а также угла атаки; D_{GV} – диаметр винта ВПУ и ГПУ, м (предполагается, что диаметры винтов ГПУ и ВПУ совпадают) [19];

$$B_{PU}^M = \begin{bmatrix} a_N \rho D_{GV}^2 h_N & a_K \rho D_{GV}^2 h_K & 0 & 0 \\ a_N \rho D_{GV}^2 l_N k_m^N & a_K \rho D_{GV}^2 l_K k_m^K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_L \rho D_{GV}^2 l_L k_m^L & a_P \rho D_{GV}^2 l_P k_m^P \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где l_N, l_K – расстояния по длине от ЦТ полного подводного объема АНПА до положения ГПУ, м; l_L, l_P – расстояния по ширине от ЦТ полного подводного объема АНПА до положения ВПУ, м; $k_m^N, k_m^K, k_m^L, k_m^P$ – коэффициенты, учитывающие падение тяги ГПУ и ВПУ соответственно в зависимости от скорости движения АНПА, углов атаки и дрейфа; h_N, h_K – расстояния по высоте от ЦТ полного подводного объема АНПА до оси носового и кормового ВПУ, м.

С учетом (13)–(14) матрица эффективности управления будет иметь вид

$$B_f = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_x^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{11})} & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_x^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{11})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_y^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{22})} & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_y^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{22})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_z^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{33})} & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_z^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{33})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_x^{\delta_{NGR}}}{\rho I_x(1+k_{44})} & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_x^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{44})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_y^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{55})} & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_y^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{55})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_z^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{66})} & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_z^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{66})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Тогда матрица, характеризующая отказ, примет вид $\mathbf{F} = \text{diag}(1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$, а матрица эффективности управления с отказавшими НГР примет вид

$$B_f = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_x^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{11})} & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_x^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{11})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_y^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{22})} & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_y^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{22})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_z^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{33})} & \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} \frac{c_z^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{33})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_x^{\delta_{NGR}}}{\rho I_x(1+k_{44})} & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_x^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{44})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_y^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{55})} & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_y^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{55})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_z^{\delta_{NGR}}}{\rho V(1+k_{66})} & \frac{\rho v^2}{2} V \frac{m_z^{\delta_{KR}}}{\rho V(1+k_{66})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Как видно из (4), а также из матрицы \mathbf{B}_f (13)–(16), при отказе НГР необходимые силы и моменты можно компенсировать ВПУ, положение которых на корпусе АНПА показано на рис. 1, или УДС. Пусть по результатам априорного анализа наиболее целесообразным для данной скорости АНПА оказалось использование ВПУ. Тогда искомая компенсирующая матрица имеет вид

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_L \rho D_{GV}^2 & a_P \rho D_{GV}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_L \rho D_{GV}^2 l_V k_m^L & a_P \rho D_{GV}^2 l_V k_m^P \end{bmatrix}, \quad (19)$$

а в матрице реконфигурации (18) во второй и последней строках предпоследнего и последнего столбцов вместо 0 появятся элементы, приведенные в последних двух столбцах выражения (19).

Условие минимизации невязки сил и моментов имеет вид

$$\begin{cases} \Delta F_y = \left| F_{yVPU} - (F_{yNGR} - F_{yNGR}^*) \right| \rightarrow \min \\ \Delta M_z = \left| M_{zVPU} - (M_{zNGR} - M_{zNGR}^*) \right| \rightarrow \min \end{cases}, \quad (20)$$

где ΔF_y – невязка сил, действующих на АНПА вдоль оси y_1 ; ΔM_z – невязка вращающих моментов вокруг оси z_1 ; F_{yVPU} , M_{zVPU} – силы и моменты, создаваемые ВПУ в случае отсутствия отказа; F_{yNGR}^* , M_{zNGR}^* – силы и моменты, создаваемые заклинившимися НГР.

Определим скорости синхронного вращения левого и правого ВПУ n_{LVPU} и n_{PVPU} обеспечивающие минимизацию невязки (20) и компенсирующие моменты, кото-

рые могли бы быть созданы отказавшими НГР с учетом сил и моментов, вызванных заклиниванием НГР.

В случае равенства моментов из (18) и (19) получаем выражение для определения скорости вращения ВПУ:

$$n_{VPU} = \sqrt{\frac{\left(m_z^{\delta_{NGR}} \delta_{NGR} - m_z^{\delta_{NGR}^*} \delta_{NGR}^*\right) \frac{\rho v^2}{2} V}{2a_L \rho D_{GV}^2 l_V k_m^L}}, \quad (21)$$

при которой в максимальной степени компенсируются необходимые силы и моменты для продолжения движения АНПА с требуемыми параметрами.

Динамическая модель АНПА была авторами программно реализована, включая дружественный интерфейс для задания исходных данных и наглядного отображения результатов моделирования как по отдельным исполнительным устройствам (их параметрам, силам и моментам), так и по АНПА в целом, в том числе по его положению в абсолютной системе координат.

Для получения количественных результатов реконфигурации моделировалось заглубление АНПА на разгонном участке траектории. Задавались целевая скорость движения АНПА и целевая глубина, равная 100 м. По ним с использованием регуляторов движения и текущего состояния АНПА определялся момент, по которому, в свою очередь, вычислялся текущий угол перекладки НГР. Состояние АНПА определялось угловыми и линейными скоростями, углами курса, крена, дифферента, а также углами атаки и дрейфа. При этом учитывались параметры аппарата:

- полное подводное объемное водоизмещение,
- метацентрическая высота,
- начальная (эксплуатационная) избыточная плавучесть,
- геометрия положения рулей, подруливающих устройств и УДЦ относительно корпуса АНПА,
- параметры МД (обобщенная поступь и диаметр гребного винта),
- параметры ВПУ и ГПУ,
- параметры УДЦ (скорость приема/откачки воды, объем каждой цистерны),
- параметры динамического поведения АНПА (присоединенные массы и моменты инерции),
- параметры среды (плотность воды).

При определении гидродинамических сил, действующих на АНПА, использовались коэффициенты сил и моментов, зависящие от угла атаки и угла дрейфа во всех трех плоскостях, а также их взаимовлияние. Кроме того, учитывались гидродинамические коэффициенты для рулей, зависящие от направления их перекладки. Все перечисленные параметры соответствовали АНПА, близкому по своим характеристикам к рассматриваемому.

Расчет параметров движения АНПА и его положения осуществлялись периодически через определенные равные промежутки времени, именуемые тактами имитации. В каждом такте оценивались изменения параметров как исполнительных устройств, так и АНПА в целом. Такой подход использовался ранее в [20–24] для решения различных задач применения АНПА, в том числе при моделировании его движения для ведения сейсморазведки. Данный метод позволял наглядно наблюдать

за динамикой процесса функционирования АНПА и его исполнительных устройств, сил и моментов, создаваемых как отдельно каждым устройством, так и проекциями на оси связанной системы координат и результатами воздействия этих сил и моментов на изменение положения аппарата в течение такта имитации.

На первом этапе предложенного метода оценивались результаты использования двух альтернативных исполнительных устройств, обеспечивающих заглубление АНПА, – НГР и ВПУ. Рассматривалось два варианта разгона АНПА: до скорости 0,5 м/с и 2 м/с. При использовании ВПУ учитывалось постепенное увеличение скорости вращения его винтов. Оценивались текущий дифферент, момент M_z , определяемый регулятором, фактический момент M_z , проекция скорости АНПА на вертикальную ось y_1 , глубина погружения АНПА. На рис. 2, а приведено изменение вертикальной скорости погружения АНПА с течением времени при его разгоне до 0,5 м/с. По горизонтальной оси отложено время в тактах имитации, соответствующих периоду пересчета параметров АНПА. Гладкая тонкая линия соответствует использованию НГР, наклонная – ВПУ.

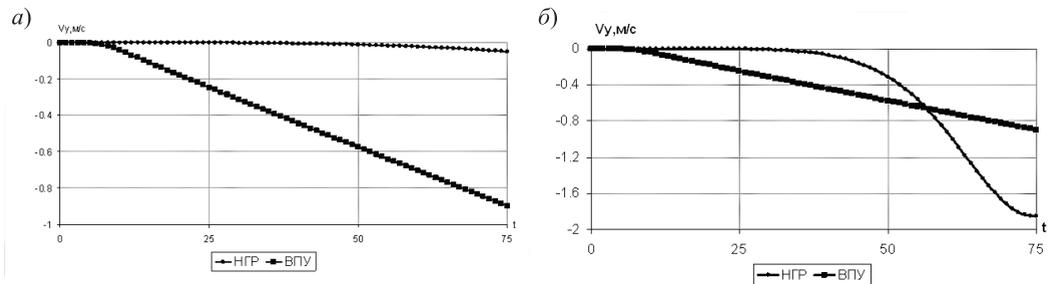


Рис. 2. Изменение вертикальной скорости при разгоне АНПА до 0,5 м/с (а) и 2 м/с (б)

Из рис. 2, а видно, что использование ВПУ намного эффективнее, чем НГР: уже к 75 такту имитации вертикальная скорость АНПА почти в 10 раз выше, чем у НГР. Такой разброс связан с тем, что формирование НГР силы и момента возможно только при набегающем потоке жидкости, а для ВПУ этого не требуется, поэтому на небольшой скорости движения АНПА применение ВПУ оказалось более эффективным. С увеличением разгонной скорости до 2 м/с, наоборот, использование НГР оказалось намного эффективнее, чем ВПУ (рис. 2, б). При использовании НГР пологий участок изменения скорости в правой части графика на рис. 2, б вызван тем, что, пока АНПА набирал скорость, набегающего потока было недостаточно для создания сил и моментов для заглубления. Вместе с тем при достижении АНПА скорости 1 м/с применение НГР стало приводить к существенному увеличению скорости заглубления АНПА по сравнению с ВПУ. В результате к 75 такту имитации вертикальная скорость АНПА при использовании НГР в 2 раза превысила скорость, формируемую с помощью ВПУ.

Таким образом, и НГР, и ВПУ способствуют нарастанию скорости заглубления, но при различных скоростях движения АНПА, что позволяет их рассматривать в качестве альтернативных исполнительных устройств, способных дублировать друг друга в случае отказа одного из них.

Ввиду этого на следующем этапе исследований реконфигурации СУ рассмотрен тот же самый вариант заглубления АНПА с разгоном до 2 м/с. В ходе моделирования

предполагалось, что в некоторый момент времени (на 70-м такте имитации) произошел отказ привода НГР, что привело к его заклиниванию в текущем положении. В начальной стадии заглужения для создания необходимого момента угол перекадки НГР максимальный, а затем по мере заглужения его значение постепенно уменьшается, создавая так называемую глиссаду. В результате при заклинивании НГР угол перекадки оказался больше, чем требовалось при штатном заглужении с его использованием. На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования для трех вариантов: штатной работы НГР (обозначено «НГР»), заклинивания НГР («клин НГР») и реконфигурации («НГР+ВПУ»).

На рис. 3, а тонкой горизонтальной линией показана вертикальная скорость движения АНПА при штатной работе НГР, средней по толщине прямой линией, расположенной по диагонали, – вертикальная скорость движения АНПА при заклинивании НГР.

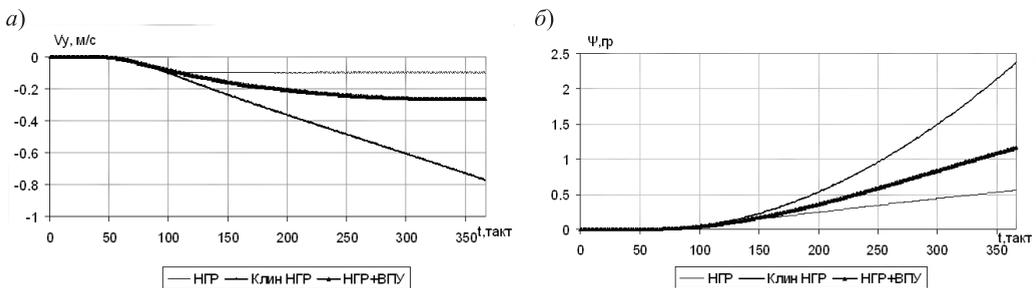


Рис. 3. Изменение вертикальной скорости (а) и дифферента (б) при отказе НГР

Заклинивание НГР привело к увеличению с течением времени дифферента (рис. 3, б, тонкая линия, расположенная по диагонали), характер которого близок к экспоненциальному. Подобное увеличение способно привести в конечном итоге к сваливанию АНПА в штопор и затоплению.

В связи с этим использование ВПУ должно было в максимально возможной степени компенсировать момент, создаваемый заклинившими НГР. Исходя из этого определялась скорость и направление вращения винта ВПУ: работа ВПУ создавала тягу, направленную вверх, в противоположность заглужению АНПА. В ходе проведения численного эксперимента оказалось, что при заклинивании НГР скорость АНПА уже достигла целевого значения, а НГР создавали такой сильный момент, что на этой скорости ВПУ не в состоянии были его компенсировать. В связи с этим для повышения эффективности работы ВПУ было одновременно организовано снижение скорости движения АНПА путем сброса оборотов гребного винта. В таком режиме работа ВПУ оказалась более эффективной, а влияние НГР, наоборот, ослабло. В результате был достигнут желаемый эффект: реконфигурация позволила избежать сваливания АНПА в штопор. На рис. 3 комбинированное использование ВПУ со снижением скорости движения АНПА показано жирной линией. Характер вертикальной скорости движения АНПА на рис. 3, а демонстрирует переход АНПА к установившемуся движению.

На рис. 4, а показано изменение глубины в результате реконфигурации на критическом участке сразу после заклинивания НГР.

Результаты моделирования показали, что из-за заклинивания НГР глубина АНПА к 370 такту имитации достигла бы 111 м вместо 25 м при его штатной работе, а диф-

ферент составил бы $2,3^\circ$ вместо штатных $0,5^\circ$. Реконфигурация с использованием ВПУ и одновременным замедлением хода позволила избежать катастрофического сваливания АНПА на глубину: заглупление составило 55 м, а дифферент – $1,6^\circ$. На рис. 4, б показаны траектории заглупления АНПА: в отсутствие заклинивания НГР (верхняя тонкая линия), сваливание АНПА на глубину при заклинивании НГР (дугообразная линия), с использованием ВПУ при заклинивании НГР (жирная пологая линия). Результаты, приведенные на рисунке 4, б, показывают, что хотя использование ВПУ сразу после заклинивания НГР приводит к превышению глубины, однако с течением времени положение АНПА выравнивается, в результате чего аппарат благополучно достигает глубины 100 м, имея в этот момент нулевой дифферент.

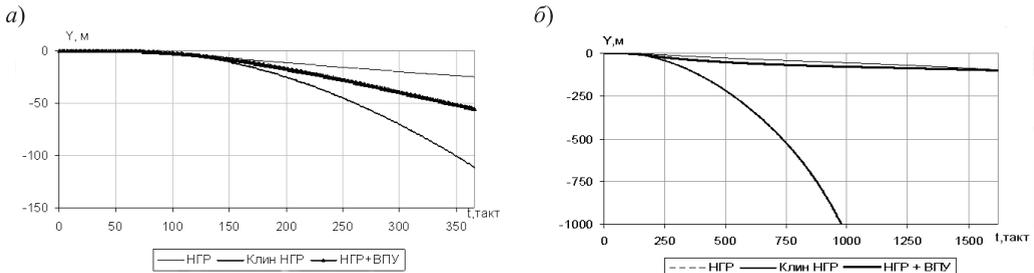


Рис. 4. Заглупление АНПА в результате реконфигурации: на критическом участке (а) и при достижении заданной глубины (б)

Заключение

В работе решается задача реконфигурации системы управления движением АНПА в случае отказа привода или исполнительных устройств, что может привести к неуправляемому процессу, сваливанию в штопор и затоплению аппарата. В силу ряда причин, таких как: разнородность исполнительных устройств, работающих на различных физических принципах; широкий диапазон условий эксплуатации аппарата; нелинейность уравнений модели движения и отсутствие ЛПР, – методы реконфигурации, используемые применительно к летательным аппаратам, оказались непригодными для АНПА.

В работе поставлена задача формирования алгоритмов реконфигурации системы управления движением АНПА. Предложен подход к проведению реконфигурации системы управления движением АНПА, в соответствии с которым предварительно формируется банк данных результатов влияния исполнительных устройств, используемых в разрабатываемом АНПА, на его поведение. Затем эти данные используются для выработки алгоритмов управления АНПА. Предложенный подход обладает универсальностью, так как может быть использован не только для рассматриваемого АНПА, но и для любого другого.

Приведен пример реализации предложенного подхода в случае отказа привода управления НГР при заглуплении АНПА на разгонном участке траектории. Результаты численного эксперимента позволили получить количественные оценки влияния их заклинивания на дальнейшее поведение АНПА – сваливание в штопор и заглупление. Реконфигурация позволила стабилизировать характер заглупления и избежать катастрофы.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении применения предложенного подхода для других систем АНПА, прежде всего энергетической, содержащей разнородные источники электроэнергии, системы связи, освещения обстановки и т.д. Подход может помочь обеспечить устойчивость работы системы управления аппарата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №20-08-00130).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Апполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.** О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону – Таганрог, ЮФУ. 2018. С.34–42.
2. **Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А.** Навигация и управление движением судов. Элмор, СПб, 2002. 359 с.
3. **Ефанов Д.Е.** Аналитическое решение задачи сохранения заданных характеристик устойчивости воздушного судна при реконфигурации системы управления. Диссертация. на соиск. уч.ст канд. техн.наук. М. 2017. 139 с.
4. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Пролетарский А.В.** Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата // Известия ВУЗ. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 14–20.
5. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Ефанов Д.Е.** Аналитический синтез законов управления продольным движением летательного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2015. №2. С. 3–14.
6. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Кульчак А.М.** Аналитическое решение задачи оптимальной реконфигурации системы управления летательного аппарата при отказе нескольких органов управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 59–66.
7. **Инсаров В.В., Тихонова С.В., Ефанов Д.Е., Пестов К.А., Халабуда А.А.** Интегрированная база данных для решения исследовательских задач тестирования алгоритмов систем технического зрения беспилотных летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 6 (144). С. 27–34.
8. **Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Поклад М.Н., Ефанов Д.Е.** Аналитический синтез законов управления продольным движением одновинтового вертолета // Автоматика и телемеханика. 1979. № 8. С. 120–128.
9. **Кульчак А.М., Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю.** Реконфигурация комплексной системы управления воздушного судна при отказах приводов с учетом ограничений на управление // Научный Вестник МГТУ ГА. Т. 21. №6. 2018. С. 65–78
10. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В.** Аналитический синтез многосвязных отказоустойчивых систем управления с упрощенной схемной реализацией // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 108–117.
11. **Shuping Hou, Jian Xu, Zheping Yan,** Implementation of Autonomous Reconfigured Control for AUV Based on Fault Detection and Isolation. DOI: 10.1109/ICMA.2007.4303543.
12. **Zhu, D., Liu, Q., Yang, Y.,** An Active Fault-Tolerant Control Method Of Unmanned Underwater Vehicles with Continuous and Uncertain Faults, International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, no.5, pp. 411–418.
13. **Yang, Z., Blanke, M., Verhagen, M.,** Robust control mixer method for reconfigurable control design using model matching, IET Control Theory & Applications, 2007, no. 1, pp. 349–357.
14. **Tacconi, G., Tiano, A.** Reconfigurable Control of an Autonomous Underwater Vehicle, 2002. DOI: 10.1109 / UUST.1989.754740
15. **Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.** Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
16. **Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б.** Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.

17. Кормен Т. Лейзерсон Ч., Ривестом Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. Жадные алгоритмы (глава 16). М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2001. С. 889–892.
18. Король А. Движение подводной лодки в вертикальной плоскости при переключке горизонтальных рулей. URL: <https://podlodka.info/education/34-the-theory-of-submarine/358-the-movement-of-the-submarine-in-the-vertical-plane-with-the-relaying-of-hydroplanes.html> (дата обращения 17.02.2020).
19. Юдин Ю.И., Юдин А.Ю., Мартюк Г.И. Математическое моделирование работы подруливающего устройств // Вестник МГТУ. 2006. Том 9. №2. С.220–223.
20. Мартынова Л.А. Розенгауз М.Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. 2016. №5 (84). С. 25–34.
21. Мартынова Л.А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсмозаземки // Информационно-управляющие системы. 2017. №1 (86). С. 83–92.
22. Мартынова Л.А. Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсмозаземки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2017. №2 (87). С. 77–87.
23. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетцентрической системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. 2017. №3 (88). С. 47–57.
24. Мартынова Л.А. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех // Информационно-управляющие системы. №1. 2018. С. 31–41.

Martynova, L.A., Rozengauz, M.B. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Approach to Reconfiguration of Motion Control System of Autonomous Underwater Vehicle, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2 (109), pp. 131–146.

Abstract. The article considers a problem of motion control system reconfiguration for an autonomous underwater vehicle (AUV) in the event of a failure of its controls and actuators providing the vehicle propulsion and maneuvering. The features of heterogeneous actuators based on different physical principles are analyzed. A nonlinear mathematical model of the vehicle motion is formed taking into account the peculiarity of the marine environment associated with increased viscosity. Nonlinearity does not allow us to solve the problem of reconfiguration using traditional approaches applied to the aircraft.

The approach is proposed for reconfiguration of the AUV motion control system, consisting in a preliminary analysis of the conditions for using heterogeneous actuators depending on the vehicle speed and maneuver. The choice of alternative functional actuators is based on the necessity to maximize the degree of compensation of forces and moments generated by the failed device or its drive.

The results of AUV motion control system reconfiguration are obtained for the case of a failure of the drive which controls the bow horizontal rudders, when performing the deepening maneuver at the acceleration area of the trajectory. Vertical thrusters are considered as backup devices, their parameters are determined, which compensate the forces and moments of failed jammed bow horizontal rudders. By way of mathematical simulation of the AUV deepening maneuver we obtained the comparative quantitative estimates of AUV motion control system reconfiguration results.

Further research is concerned with the application of the proposed approach for other systems of unmanned underwater vehicles.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV), motion control system, reconfiguration.

Материал поступил 28.02.2020