

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ АНПА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СО СТОРОНЫ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

А.Ю. Коноплин, Н.А. Красавин, Р.П. Василенко

В статье описан новый метод синтеза систем автоматической стабилизации в режиме зависания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных многозвенными манипуляторами (ММ). Предложенный метод предполагает установку на АНПА дополнительного движителя, расположенного на одной оси вращения с первым звеном манипулятора выше центра величины аппарата на выносном штоке, закрепленном на поворотной платформе. Это расширяет исходный движительно-рулевой комплекс (ДРК) и позволяет главным образом компенсировать воздействия со стороны ММ, приводящие к смещениям АНПА по углам крена и дифферента. С учетом особенностей компоновки движителей формируются сигналы управления ДРК для компенсации динамических воздействий, обусловленных выполнением рабочим инструментом (РИ) ММ контактных силовых операций с целевыми объектами. При этом обеспечивается управление тягой и углом поворота платформы дополнительного движителя.

Результаты исследований синтезированной системы стабилизации АНПА, проведенных с помощью численного моделирования в Matlab/Simulink с визуализацией в симуляторе CoppeliaSim, показали ее работоспособность и высокую эффективность при выполнении манипуляционных операций.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система стабилизации, движительно-рулевой комплекс, контактные операции, многозвенный манипулятор, режим зависания.

Введение

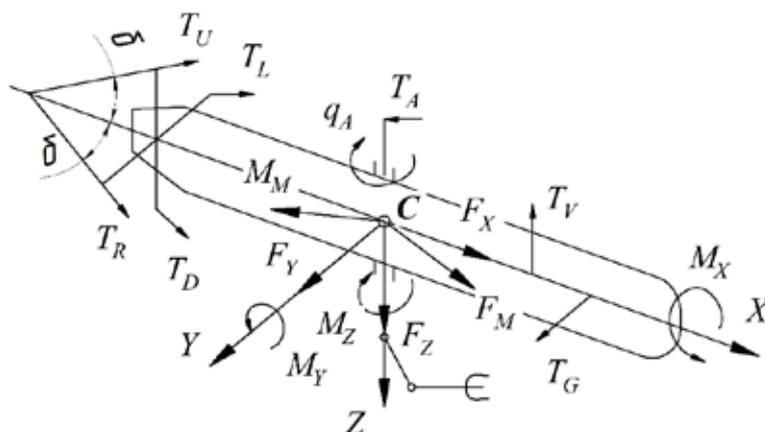
АНПА являются одними из самых перспективных средств изучения и освоения Мирового океана, с помощью которых эффективно выполняется широкий перечень поисковых, осмотровых и мониторинговых операций [1]. Оснащение таких АНПА манипуляционными комплексами [2–7] позволит значительно расширить область их применения за счет возможности выполнения контактных операций с целевыми объектами, значительно снижая затраты на проведение таких работ по сравнению с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Многими исследователями отмечалось, что манипуляционные операции целесообразно выполнять в режиме стабилизируемого зависания АНПА над объектом работ [8–10], поскольку в этом режиме аппарат не взмучивает придонные слои воды и может

занимать наиболее удобное положение относительно объекта для выполнения работ.

Однако зависший в толще воды АНПА подвержен воздействию сил и моментов со стороны работающего ММ [8–13], вызванных влиянием вязкой среды на его движущиеся звенья, а также силовым контактом РИ с объектом работ. Эти воздействия отклоняют АНПА от начального положения, что затрудняет или делает невозможным выполнение требуемой операции.

Конструкции корпусов и конфигурации ДРК типовых АНПА обычно обеспечивают эффективное движение в крейсерском режиме. Но известные методы, например [8–10], не позволяют обеспечить качественную стабилизацию АНПА при выполнении манипуляционных операций в режиме зависания, поскольку подразумевают наличие у аппарата развитого ДРК, обеспечивающего его стабилизацию по всем

Рис. 1. Компоновочная схема расширенного ДРК АНПА с ММ



шести степеням свободы. В работе [14] рассматривается система управления ограниченным числом степеней свободы АНПА в режиме позиционирования, однако возможностей этой системы недостаточно для компенсации произвольных динамических воздействий на аппарат работающего ММ.

Для решения указанной проблемы АНПА могут оснащаться дополнительными плавниками и другими устройствами, что требует внесения значительных изменений в конструкцию аппаратов и снижает их ходовые качества [15, 16]. В работе [3] предложено автоматически снижать скорость движения ММ для уменьшения динамических воздействий на АНПА, которые ДРК не может эффективно скомпенсировать. Однако это приводит к увеличению времени выполнения операции и не позволяет оказывать манипулятором заданное воздействие на объект работ.

В результате можно сделать вывод, что известные методы и подходы все еще не могут в полной мере обеспечить качественную стабилизацию АНПА в режиме зависания при работающем ММ.

В данной работе предложен метод синтеза системы стабилизации АНПА, предполагающий установку на аппарат дополнительного поворачиваемого движителя, а также согласованное управление тягами всех движителей аппарата для компенсации динамических воздействий со стороны ММ.

1. Расширение ДРК для обеспечения стабилизации АНПА в процессе работы ММ

Для работы АНПА в режиме зависания над объектом или вблизи него обычно используется ДРК, состоящий из четырех маршевых и двух подруливающих движителей [17], которые позволяют управлять аппаратом по 5 степеням свободы (3 поступательные и 2 вращательные). Для обеспечения работы АНПА с

манипулятором предлагается расширить ДРК дополнительным движителем на поворотной платформе (рис. 1). Этот движитель должен быть расположен на одной оси вращения с первым звеном ММ выше центра величины АНПА на выносном штоке, что позволит главным образом компенсировать воздействия со стороны ММ, приводящие к смещениям аппарата по углам крена и дифферента. Так как большинство современных АНПА имеют модульную конструкцию, позволяющую изменять набор бортового оборудования, целесообразно реализовать ММ с дополнительным движителем на отдельной секции, которая будет сниматься с аппарата перед выполнением миссий, не связанных с проведением манипуляционных работ.

На рис. 1 введены следующие обозначения: $CXYZ$ – система координат (СК), жестко связанная с АНПА, ось CX которой направлена вдоль продольной оси аппарата, ось CZ направлена вертикально вниз, а ось CY дополняет их до правой тройки; C – центр величины АНПА; T_U, T_D, T_L, T_R – тяги, формируемые маршевыми движителями; T_V, T_G – тяги, формируемые подруливающими движителями; δ – угол, образуемый продольными осями маршевых движителей с продольной осью CX АНПА; $\vec{F}_M = [F_{M_x}, F_{M_y}, F_{M_z}] \in R^3$, $\vec{M}_M = [M_{M_x}, M_{M_y}, M_{M_z}] \in R^3$ – соответственно векторы силового и моментного воздействий со стороны ММ на центр величины АНПА, рассчитываемые с помощью метода [18]; T_A – тяга, формируемая дополнительным движителем; $F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z$ – составляющие результирующих векторов сил и моментов, с которыми ДРК воздействует на центр величины АНПА; q_A – угол поворота платформы, на которой располагается дополнительный движитель.

Для принятой компоновочной схемы расширенного ДРК АНПА (рис. 1) зависимость элементов результирующих векторов сил и моментов от тяг, создаваемых движителями, можно описать с помощью выражений:

$$\begin{aligned}
 F_X &= (T_U + T_D + T_L + T_R) \cos \delta + T_A \cos q_A = (T_U + T_D + T_L + T_R) \cos \delta + F_{A_x}, \\
 F_Y &= (T_R - T_L) \sin \delta + T_G + T_A \sin q_A = F_{S_y} + T_G + F_{A_y}, \\
 F_Z &= (T_D - T_U) \sin \delta - T_V = F_{S_z} - T_V, \\
 M_X &= T_A L_A \sin q_A = F_{A_y} L_A, \\
 M_Y &= (T_D - T_U) L_S \sin \delta + T_V L_V - T_A L_A \cos q_A = M_{V_y} + T_V L_V - F_{A_x} L_A, \\
 M_Z &= (T_L - T_R) L_S \sin \delta + T_G L_G = M_{G_z} + T_G L_G,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где F_{A_x} , F_{A_y} , F_{S_y} , F_{S_z} , M_{V_y} , M_{G_z} , M_{A_y} – проекции создаваемых движителями сил и моментов на соответствующие оси СК $CXYZ$, L_A, L_S, L_G, L_V – геометрические параметры компоновки движителей АНПА.

Описанный ДРК (1) является избыточным, поскольку в нем исполнительных механизмов больше, чем количество доступных для управления степеней свободы. Поэтому возникает задача распределения управляющих воздействий между элементами ДРК. Используя подход [14], примем, что управляющее воздействие, направленное вдоль оси CX связанной с АНПА СК, а также управления по курсу и дифференту формируются группой маршевых движителей, расположенных в кормовой части АНПА, причем сигнал управления по дифференту формируется с учетом момента, создаваемого дополнительным движителем. Воздействия, направленные вдоль осей CY и CZ , формируются горизонтальным и вертикальным подруливающими движителями соответственно. При этом нежелательные моменты, создаваемые подруливающими движителями, компенсируются тягами маршевых движителей. С учетом вышеизложенного для компенсации силовых и моментных воздействий на АНПА со стороны ММ исходный ДРК должен создавать следующие элементы желаемых векторов результирующих тяги и момента:

$$\begin{aligned}
 F_X^* &= -F_{M_x} - F_{A_x}, \quad F_Y^* = -F_{M_y} - F_{A_y} - F_{S_y}, \\
 F_Z^* &= -F_{M_z} - F_{S_z}, \quad M_Y^* = -M_{M_y} - M_{V_y} - M_{A_y}, \\
 M_Z^* &= -M_{M_z} - M_{G_z}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

В результате с учетом (1) и (2) желаемые значения тяг движителей исходного ДРК будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 T_U^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} - \frac{M_Y^*}{2 L_S \sin \delta}, \\
 T_D^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} + \frac{M_Y^*}{2 L_S \sin \delta},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_L^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} + \frac{M_Z^*}{2 L_S \sin \delta}, \\
 T_R^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} - \frac{M_Z^*}{2 L_S \sin \delta}, \\
 T_V^* &= -F_Z^*, \quad T_G^* = F_Y^*.
 \end{aligned} \tag{3}$$

При этом системы управления движителями АНПА [14] обеспечивают близость реальных и желаемых значений создаваемых тяг. Для маршевых движителей с допущением линейности их статических характеристик выполняется равномерное распределение управляющих воздействий между конкурирующими каналами управления [19].

Как уже отмечалось выше, дополнительный движитель на поворотной платформе позволяет управлять угловыми перемещениями АНПА по крену и дифференту в случае, если исходный ДРК не может скомпенсировать динамические воздействия ММ на аппарат. Поскольку эти воздействия носят произвольный характер, необходимо в реальном масштабе времени задавать такие значения q_A и T_A , которые обеспечат стабилизацию АНПА как по углу крена, так и по углу дифферента. В результате желаемые значения тяги T_A^* и угла q_A^* поворота дополнительного движителя рассчитываются с помощью выражений:

$$T_A^* = \frac{\sqrt{M_X^{*2} + M_{A_y}^{*2}}}{L_A}, \tag{4}$$

$$q_A^* = \operatorname{atan} 2 \left(-\frac{M_X^*}{M_{A_y}^*} \right), \tag{5}$$

где $M_X^* = -M_{M_x}$, $M_{A_y}^*$ – желаемое значение момента вокруг оси CY , который должен создавать дополнительный движитель. При этом вводятся специальные условия, позволяющие однозначно определять величину угла q_A^* и инвертировать тягу T_A^* для того, чтобы избежать скачкообразного изменения q_A^* .

В случае, когда у дополнительного движителя есть достаточный запас по управлению, чтобы ском-

пенсировать моментные воздействия как вокруг оси CX , так и вокруг оси CY , величина M_{Ay}^* в выражении (4) принимает вид: $M_{Ay}^* = -M_{My} - M_{Vy}$. Если же возможностей дополнительного движителя недостаточно для стабилизации АНПА одновременно по крену и дифференту, то целесообразно ограничивать сигнал управления этим движителем по углу дифферента, чтобы гарантированно обеспечить стабилизацию АНПА по углу крена. При этом часть сигнала управления, сформированного для стабилизации аппарата по углу дифферента (2), которая не может быть отработана дополнительным движителем, должна подаваться на маршевые движители. Таким образом, если значение желаемой тяги дополнительного движителя, полученное в соответствии с выражением (4), превышает предельное значение тяги T_A^O этого движителя:

$$T_A^* > T_A^O, \quad (6)$$

то вычисляется значение необходимой тяги T_{Amx}^* , которую должен сформировать дополнительный движитель для стабилизации АНПА по углу крена:

$$T_{Amx}^* = \frac{|M_x^*|}{L_A}. \quad (7)$$

Далее, учитывая запас дополнительного движителя по мощности:

$$T_{Amx}^* = \sqrt{(T_A^O)^2 - (T_{Amx}^*)^2}, \quad T_A^O \geq T_{Amx}^*, \quad (8)$$

в выражениях (4) и (5) используется следующее желаемое значение момента вокруг оси CY , который должен создавать дополнительный движитель:

$$M_{Ay}^* = \text{sign}(\tilde{M}_y^*) L_A T_{Amx}^*, \quad (9)$$

где $\tilde{M}_y^* = -M_{My} - M_{Vy}$;

T_{Amx}^* – тяга, которую может сформировать дополнительный движитель для стабилизации угла дифферента после того, как обеспечивается стабилизация по крену.

В результате на основе разработанного метода с учетом выражений (2)–(9) была синтезирована система стабилизации АНПА,

блок-схема которой изображена на рис. 2. На этом рисунке введены следующие обозначения: БУДД – блок управления дополнительным движителем, который вычисляет q_A^* и T_A^* ; БРВ – блок расчета воздействий, который рассчитывает силы и моменты, с которыми дополнительный движитель действует на АНПА; ОСУ – ограничитель сигнала управления по дифференту для дополнительного движителя; ПП – поворотная платформа; ДВ_U, ДВ_D, ДВ_L, ДВ_R, ДВ_V, ДВ_G, ДВ_A – движители АНПА; U(T) – функции (регуляторы), формирующие сигналы управления движителями аппарата; SAT – блок, ограничивающий желаемое значение тяги движителя; КС ДРК – компоновочная схема ДРК, которая для математической модели системы представляет собой блок, рассчитывающий в соответствии с выражениями (1) результирующие векторы силы и момента, с которыми ДРК воздействует на центр величины АНПА.

2. Исследование синтезированной системы с помощью численного моделирования

Для исследования системы, синтезированной на основе предложенного метода, была применена реализованная в Matlab/Simulink хорошо апробированная модель АНПА с ММ [3, 20], в которой использовались параметры реального АНПА ММТ-3500

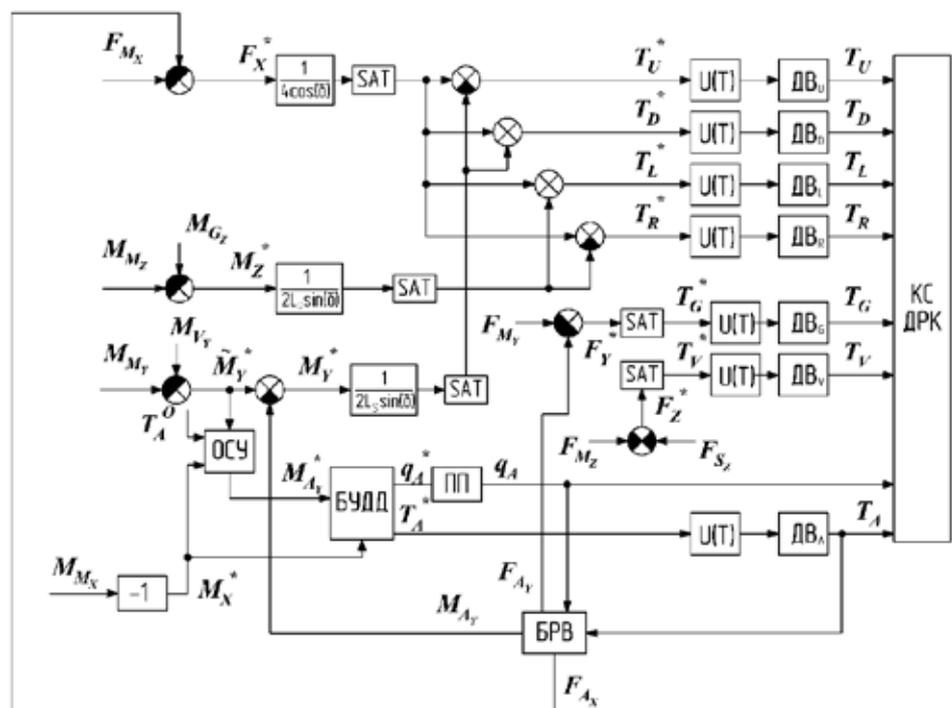


Рис. 2. Блок-схема системы стабилизации АНПА

[14] с компоновочной схемой расширенного ДРК, изображенной на рис. 1. Основные параметры указанной компоновочной схемы приведены в табл. 1. Полагалось, что в системах управления движителями АНПА используются средства адаптивной коррекции [21], поэтому все движители аппарата описывались аperiodическими звеньями первого порядка с постоянными времени, равными 0,2. Модель используемого ММ включала три переносные и одну ориентирующую степени подвижности. Все параметры многосвязника подробно описаны в работе [20], а основные из них приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры компоновочной схемы АНПА

$L_{\text{с}}, \text{ м}$	$L_{\text{л}}, \text{ м}$	$L_{\text{с}}, \text{ м}$	$L_{\text{д}}, \text{ м}$	$\delta, \text{ град}$
2,038	0,2	0,45	0,6	22,5

Система стабилизации АНПА в режиме стабилизируемого зависания помимо описанного выше разомкнутого контура, компенсирующего воздействия ММ, включает в себя замкнутый по положению и ориентации АНПА контур [10]. С помощью системы [22] корректировались траектория и ориентация РИ ММ на основе информации о линейных и угловых смещениях АНПА относительно исходного положения в пространстве.

Визуализация процесса моделирования проводилась в симуляторе CoppeliaSim (рис. 3).

Для моделирования операции отбора скоплений бактериальных матов была сформирована траектория движения РИ ММ, имитирующая забор поверхностного слоя грунта морского дна (рис. 3), при котором пробоотборник плавно погружается в грунт сбоку от продольной оси АНПА, а затем перемещается параллельно поверхности дна. В момент контакта с грунтом на РИ ММ начинал действовать вектор силы, противоположный направлению движения этого инструмента. Величина этой силы изменялась от 0 до 51 Н. Идентификация и компенсация воздействий на АНПА и ММ, возникающих в ходе силового контакта с поверхностью, осуществлялась с помощью системы [18]. Скорость движения РИ составляла 3 см/с.

Таблица 2

Параметры ММ

	Звено 1	Звено 2	Звено 3	Звено 4
Длина, м	0,05	0,5	0,5	0,15
Масса, кг	0,4	3,925	3,925	0,5

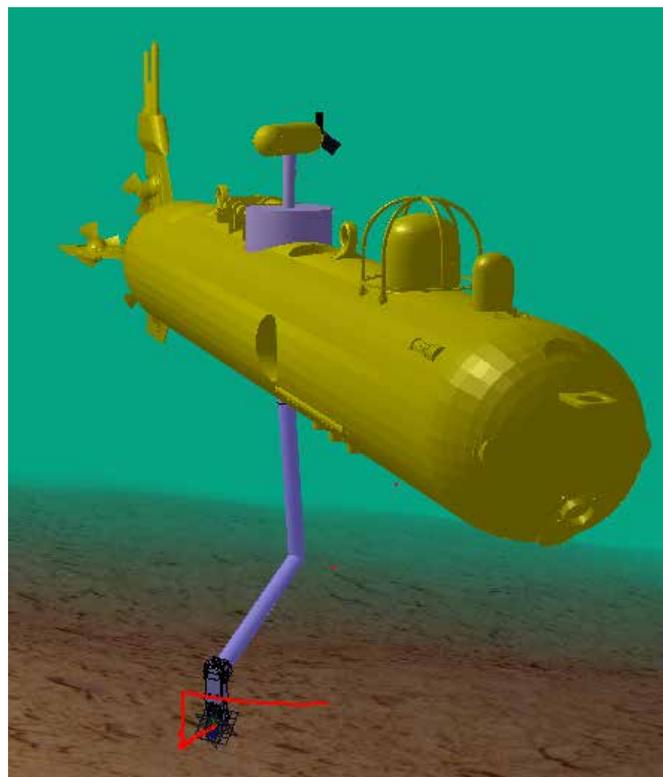


Рис. 3. Сцена в симуляторе CoppeliaSim и траектория движения РИ ММ

При выполнении указанной операции без использования дополнительного движителя на поворотной платформе угловое отклонение АНПА по крену превысило 45° (рис. 4, а $|t_1|$). В реальных условиях такой угол крена даже с использованием системы коррекции программных траекторий РИ ММ [22] приведет к потере контакта этого инструмента с объектом работ ввиду кинематических ограничений ММ и выхода объекта из зоны видимости систем технического зрения.

В процессе моделирования с установленным на АНПА дополнительным движителем линейное смещение аппарата от исходной точки не превышало 4,6 см, а наибольший крен не превышал 3° (рис. 4, а $|t_2|$). Из графиков, изображенных на рис. 4, б и 4, в, видно, что в ходе выполнения операции дополнительный движитель не входил в насыщение, а угол поворотной платформы изменялся таким образом, чтобы обеспечить стабилизацию АНПА по углам крена и дифферента. Причем можно заметить, что в момент времени $t=22$ с (рис. 4, в) движитель поворачивался таким образом, чтобы создать необходимый момент для стабилизации аппарата по углу крена. В результате обеспечивалась точная стабилизация аппарата над объектом работ в процессе выполнения силовой манипуляционной операции, а максималь-

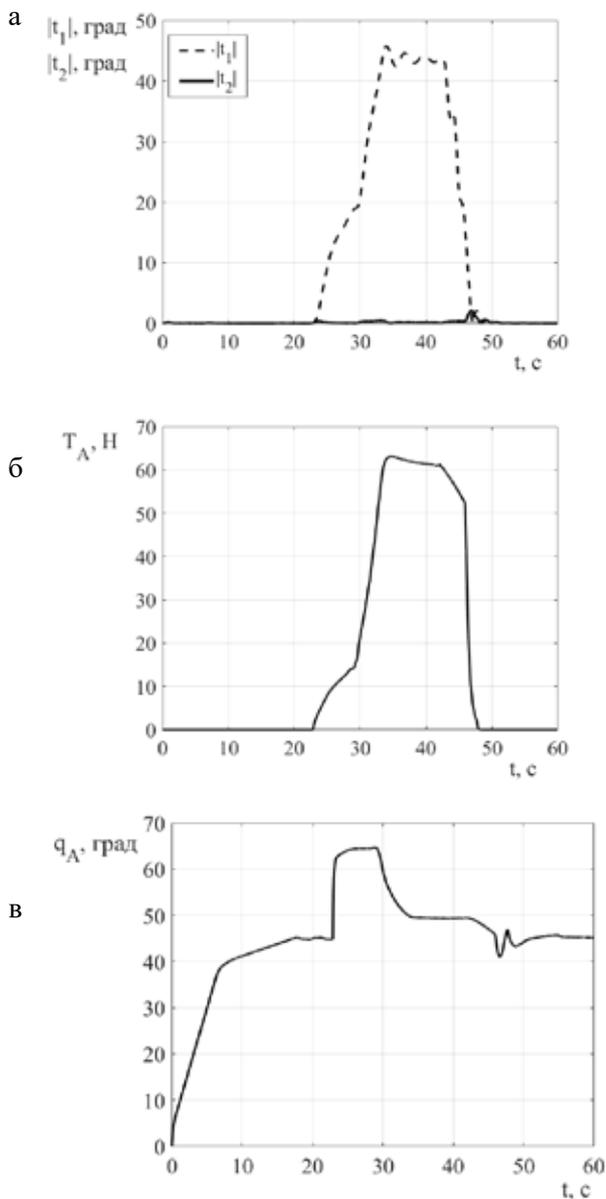


Рис. 4. Изменение угла крена АНПА (а); изменение тяги дополнительного движителя (б) и изменение угла поворотной платформы (в)

ное отклонение РИ ММ от заданной траектории не превышало 6 мм.

Также было проведено моделирование, в процессе которого РИ ММ двигался вдоль синусоидальной траектории по поверхности объекта, расположенного на морском дне (рис. 5, а), имитируя процесс очистки этого объекта от заиливания и обрастаний. С помощью системы позиционно-силового управления [18] РИ ММ непрерывно оказывал на поверхность задан-

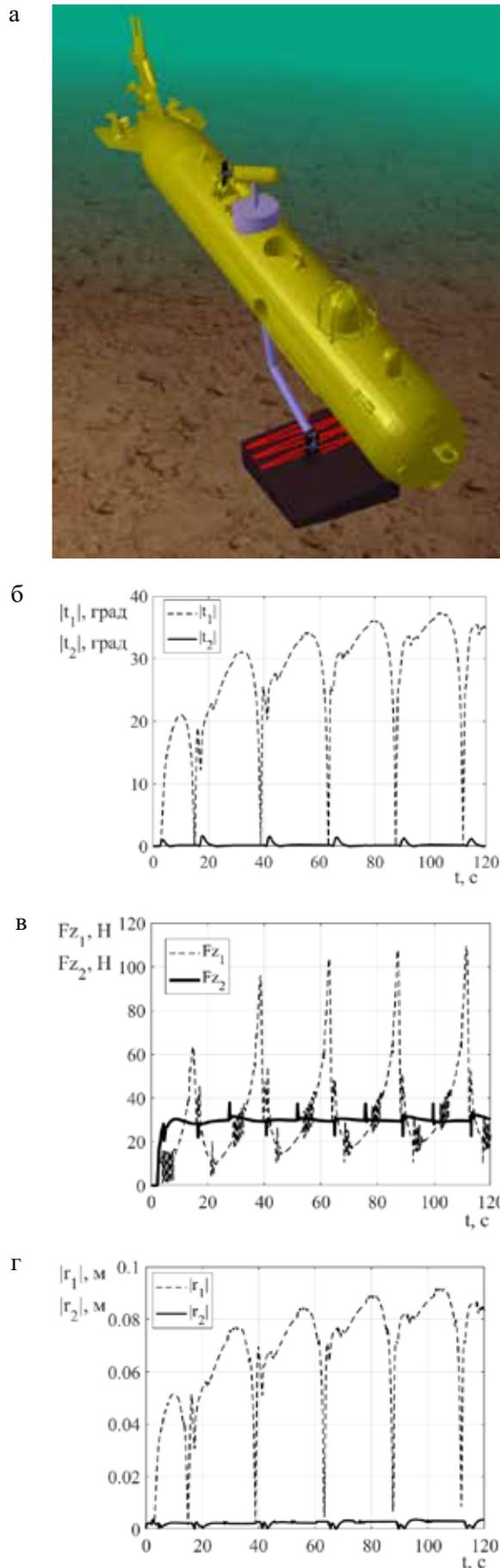


Рис. 5. Траектория на поверхности объекта работ в среде CoppeliaSim (а); изменение угла крена АНПА (б); оказываемое усилие вдоль оси OZ (в); отклонение РИ ММ (г)

ное усилие 30 Н. В процессе движения РИ на него также воздействовали составляющие сил, вызванных трением инструмента о поверхность объекта работ. Величины этих составляющих вдоль продольной и поперечной осей абсолютной СК достигали 5 Н и 10 Н соответственно. Скорость движения РИ составляла 2,5 см/с.

Без дополнительного движителя отклонения АНПА по углу крена достигали 37° (рис. 5, б $|t_1|$). При этом не удалось обеспечить оказание необходимого усилия на поверхности объекта работ (рис. 5, в Fz_1). Отклонения РИ ММ от желаемой траектории достигали 9,5 см (рис. 5, з $|r_1|$).

С использованием дополнительного движителя и предложенной системы стабилизации АНПА его отклонения по крену не превышали 3° (рис. 5, б $|t_2|$). За счет использования системы [18] силовое воздействие, оказываемое ММ на поверхность объекта, достигало заданного значения в 30 Н и поддерживалось на протяжении всего процесса моделирования с от-

клонениями не более 9% от целевого значения в установившемся режиме (рис. 5, в Fz_2). Возникающие колебания величины оказываемого усилия (рис. 5, в Fz_2) в моменты времени $t = 19$ с, 30 с, 40 с и т.д. связаны с возникновением значительных взаимовлияний в степенях подвижности ММ при изменении характера движения звеньев ММ. Отклонения РИ от желаемой траектории не превышали 4,5 мм (рис. 5, з $|r_2|$).

В процессе выполнения операции дополнительный движитель не входил в насыщение и имел достаточный запас по мощности, поскольку максимальное значение создаваемой им тяги не превышало 25 Н (рис. 6, а). Изменение угла поворотной платформы показано на рис. 6, б.

Заключение

Результаты проведенного численного моделирования подтвердили эффективность использования разработанной системы для выполнения контактных манипуляционных операций при стабилизации АНПА в режиме зависания над объектом или вблизи него. При этом важно отметить, что качество работы предложенной системы во многом зависит от точности и скорости идентификации реальных динамических воздействий на АНПА со стороны работающего ММ, поскольку в реальности определение величин отклонений аппарата на основе визуальной навигации происходит со значительными задержками, не позволяющими своевременно скомпенсировать возникающие отклонения аппарата с помощью следящих систем. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на внедрении разработок в АНПА ММТ-3500 производства ИПМТ ДВО РАН и проведении натуральных экспериментов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под ред. Л.В. Киселева. Владивосток: Дальпресс, 2018. 367 с.
2. Kostenko V. V., Bykanova A. Y., Tolstonogov A. Y. Developing the Multilink Manipulator System for an Autonomous Underwater Vehicle // IEEE International Conference on Ocean Studies (ICOS). 2022. P. 45–50.
3. Konoplin A., Krasavin N. Automatic Speed Control System for Manipulator Mounted on Underwater Vehicle // IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 205–209.
4. Marani G., Choi S. K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs // Ocean Engineering. 2009. Vol. 36. No. 1. P. 15–23.

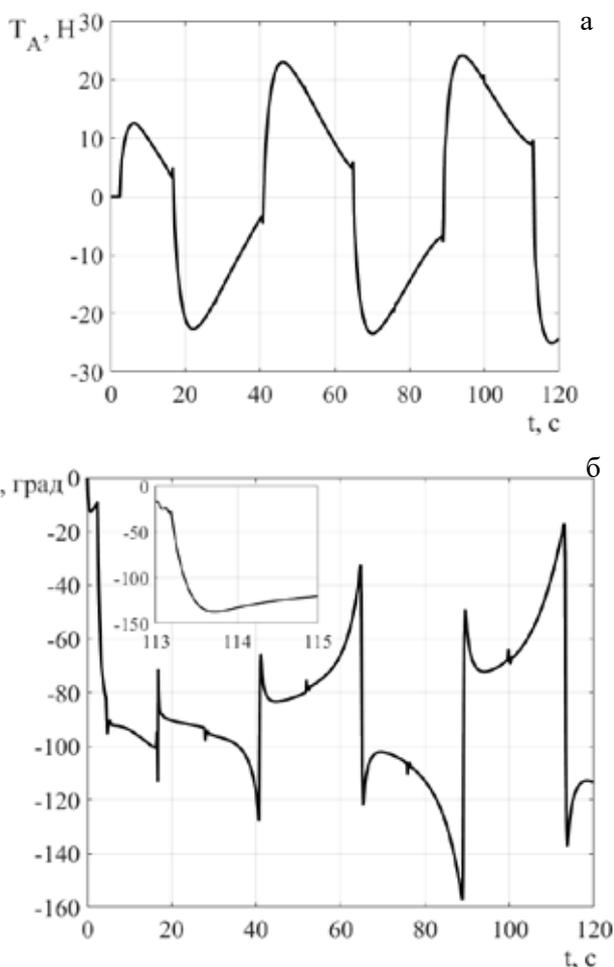


Рис. 6. Тяга дополнительного движителя при отработке траектории (а) и угол поворотной платформы (б)

5. Juan J. J. F. M. P., Pedro C. G. R. M., Penyalver J. S. A. Manipulation in the seabed: A new underwater manipulation system for shallow water intervention // *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 314–319.
6. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation // *IEEE International conference on robotics and automation (ICRA)*. 2015. P. 529–536.
7. Коноплин А.Ю., Михайлов Д.Н., Костенко В.В., Юрманов А.П., Красавин Н.А., Борейко А.А. Разработка автономного подводного робота, предназначенного для выполнения манипуляционных операций // Сб. материалов XVIII Всерос. науч.-практ. конф. “Перспективные системы и задачи управления”. Таганрог, 2023. С. 534–538.
8. McLain T. W., Rock S. M., Lee M. J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system // *Underwater Robots*. 1996. P. 139–158.
9. Dunnigan M. W., Russell G. T. Evaluation and reduction of the dynamic coupling between a manipulator and an underwater vehicle // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1998. Vol. 23. No. 3. P. 260–273.
10. Filaretov V. F., Konoplin A. Y. System of automatic stabilization of underwater vehicle in hang mode with working multilink manipulator // *IEEE International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA)*. 2015. P. 132–137.
11. Antonelli G. *Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2014. Vol. 96.
12. Sarkar N., Podder T. K. Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems subject to drag optimization // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2001. Vol. 26. No. 2. P. 228–239.
13. Kang J. I. et al. Experimental study of dynamic stability of underwater vehicle-manipulator system using zero moment point // *Journal of Marine Science and Technology*. 2017. Vol. 25. No. 6. P. 18.
14. Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. К оценке динамических характеристик АНПА ММТ-3500 на основе модельных и экспериментальных данных // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 3(41). С. 33–44.
15. Пат. № 2749466 С1 Российская Федерация, МПК В63G 8/14. Подводный аппарат с системой стабилизации над подводным объектом: / Лычев В.В., Маркова А.А., Щукин П.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». – № 2020136316, заявл. 03.11.2020; опубл. 11.06.2021.
16. Lapiere L., Fraisse P., Dauchez P. Position/force control of an underwater mobile manipulator // *Journal of Robotic Systems*. 2003. Vol. 20. No. 12. P. 707–722.
17. Kostenko V. V., Tolstonogov A. Y. Optimal Control Allocation for AUVs with Through-body Thrusters // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2022. Vol. 988. No. 3. P. 032062.
18. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Кацурин А.А. Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 4(42). С. 40–52.
19. Костенко В. В., Толстоногов А. Ю. Методы решения задачи распределения управляющих воздействий на исполнительные механизмы подводного аппарата: Краткий обзор // *Подводные исследования и робототехника*. 2020. № 1(35). С. 4–17.
20. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Zuev A. V., Krasavin N. A. A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator // *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*. 2021. Vol. 20. No. 4. P. 625–636.
21. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами / под ред. В.Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
22. Filaretov V. F., Konoplin A. Y. System of automatically correction of program trajectory of motion of multilink manipulator installed on underwater vehicle // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1441–1449.

Об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н., зав. лаб.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева
ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область интересов: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

КРАСАВИН Никита Андреевич, н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева
ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область интересов: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89025063014

E-mail: krasavya061@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1102-5409

ВАСИЛЕНКО Роман Павлович, м.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева
ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область интересов: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89020644321

E-mail: vrp261200@mail.ru

ORCID: 0009-0005-4939-2281

Для цитирования:

Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Василенко Р.П. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ АНПА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СО СТОРОНЫ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА // *Подводные исследования и робототехника*. 2023. №. 3 (45). С. 20–29. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_03. EDN: HJXGEY.

STABILIZATION SYSTEM OF AUV WITH ADDITIONAL THRUSTER TO COMPENSATE FOR DYNAMIC EFFECTS FROM MULTILINK MANIPULATOR

A.Ju. Konoplin, N.A. Krasavin, R.P. Vasilenko

The article describes a new synthesis method of automatic stabilization systems of autonomous underwater vehicles (AUV) in the hovering mode equipped with multilink manipulators (MM). The proposed method involves the installation of an additional thruster on the AUV, located on the same axis of rotation with the first link of the manipulator above the center of buoyancy on an outrigger fixed on a rotary platform. It expands the original propulsion and steering system (PSS) and allows mainly to compensate for the effects from the MM, leading to displacements of the AUV at the angles of roll and pitch. Considering the features of the thrusters layout, control signals of the PSS are formed to compensate for the dynamic effects exerted on the AUV by the MM moving in a viscous medium, whose grip can perform contact operations with target objects. At the same time, both the thrust of the additional thruster and the angle of rotary platform are controlled.

The results of studies of the synthesized AUV stabilization system by numerical simulation in Matlab/Simulink with visualization in the CoppeliaSim simulator showed its operability and high efficiency when performing manipulation operations.

Keywords: autonomous underwater vehicle, stabilization system, propulsion and steering system, contact operations, multilink manipulators, hovering mode.

References

- Inzartsev A. V., Kiselev L. V., Kostenko V. V., Matvienko Yu. V., Pavin A. M., Scherbatyuk A. F. Podvodnyie robototekhnicheskiye komplekxy: sistemy, tehnologii, primeneniye [pod. red. L. V. Kiseleva]. Vladivostok: Dalpress. 2018. 367 p.
- Kostenko V. V., Bykanova A. Y., Tolstonogov A. Y. Developing the Multilink Manipulator System for an Autonomous Underwater Vehicle. 2022 IEEE International Conference on Ocean Studies (ICOS). 2022. P. 45–50.
- Konoplin A., Krasavin N. Automatic Speed Control System for Manipulator Mounted on Underwater Vehicle. 2022 IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 205–209.
- Marani G., Choi S. K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. Ocean Engineering. 2009. Vol. 36. No. 1. P. 15–23.
- Juan J. J. F. M. P., Pedro C. G. R. M., Penyalver J. S. A. Manipulation in the seabed: A new underwater manipulation system for shallow water intervention. IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 314–319.
- Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation. 2015 IEEE International conference on robotics and automation (ICRA). 2015. P. 529–536.
- Konoplin A. Yu., Mihailov D. N., Kostenko V. V., Yurmanov A. P., Krasavin N. A., Boreiko A. A. Razrabotka avtonomnogo podvodnogo robota, prednaznachennogo dlya vipolneniya manipuliacionnih operacij. Sbornik materialov XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii "Perspektivnie sistemi i zadachi upravleniya". 2023. P. 534–538.
- McLain T. W., Rock S. M., Lee M. J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system. Underwater Robots. 1996. P. 139–158.
- Dunnigan M. W., Russell G. T. Evaluation and reduction of the dynamic coupling between a manipulator and an underwater vehicle. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1998. Vol. 23. No. 3. P. 260–273.
- Filaretov V. F., Konoplin A. Y. System of automatic stabilization of underwater vehicle in hang mode with working multilink manipulator. 2015 IEEE International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA). 2015. P. 132–137.
- Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition. Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
- Sarkar N., Podder T. K. Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems subject to drag optimization. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2001. Vol. 26. No. 2. P. 228–239.
- Kang J. I. et al. Experimental study of dynamic stability of underwater vehicle-manipulator system using zero moment point. Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 25. No. 6. P. 18.
- Kiselev L. V., Kostenko V. V., Medvedev A. V. K ochenke dinamicheskikh harakteristik ANPA MMT-3500 na osnove modelnih i eksperimentalnih dannih. Podvodnie issledovaniya i robototekhnika. 2022. No. 3(41). P. 33–44.
- Patent № 2749466 C1 Russian Federation, MPK B63G 8/14. Podvodniy apparat s sistemoy stabilizacii i podvodnim objectom: Lichev V. V., Markova A. A., Shukin P. I.; applicant and patent holder Federal State-owned Military Educational Institution of Higher Education "Voin-

niy uchebno-nauchiy centr Voenno-Morskogo Flota "Voenno-morskaya akademiya im. Admirala Florta Sovetskogo Soyuza N.G. Kuznecova". – No 2020136316 statement 03.11.2020; published. 11.06.2021.

16. Lapiere L., Fraise P., Dauchez P. Position/force control of an underwater mobile manipulator. *Journal of Robotic Systems*. 2003. Vol. 20. No. 12. P. 707–722.

17. Kostenko V. V., Tolstonogov A. Y. Optimal Control Allocation for AUVs with Through-body Thrusters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2022. Vol. 988. No. 3. P. 032062.

18. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Yurmanov A.P., Piatavin P.A., Katsurin A.A. Sistema pozicionno-silovogo upravleniya podvodnimi apparatami s mnogozvennimi manipulyatorami dlya vipolneniya kontaktnih manipuliacionnih operacij. *Podvodnie issledovaniya i robototekhnika*. 2022. No. 4(42). P. 40–52.

19. Kostenko V.V., Tolstonogov A. Yu. Metodi resheniya raspredeleniya upravlyaushih vozdeystviy na ispolnitelnie mekhanizmi podvodnogo apparata: Kratkiy obzor. *Podvodnie issledovaniya i robototekhnika*. 2020. No. 1(35). P. 4–17.

20. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Zuev A.V., Krasavin N.A. A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*. 2021. Vol. 20. No. 4. P. 625–636.

21. Filaretov V.F., Alekseev Yu.K., Lededev A.V. Sistemi upravleniya podvodnimi robotami. *Pod red. V.F. Filaretova. M.: Krugliy god*. 2001. 288.

22. Filaretov V. F., Konoplin A. Y. System of automatically correction of program trajectory of motion of multilink manipulator installed on underwater vehicle. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1441–1449.

Recommended citation:

Konoplin A.Ju., Krasavin N.A., Vasilenko R.P. STABILIZATION SYSTEM OF AUV WITH ADDITIONAL THRUSTER TO COMPENSATE FOR DYNAMIC EFFECTS FROM MULTILINK MANIPULATOR. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 3 (45). P. 20–29. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_03. EDN: HJXGEY.

About authors

KONOPLIN Aleksandr Jurevich, Ph.D, head of laboratory Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Sphere of interest: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Phone: 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

KRASAVIN Nikita Andreevich, scientific researcher Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Sphere of interest: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Phone: 89025063014

E-mail: krasavya061@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1102-5409

VASILENKO Roman Pavlovich, engineer

Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Far Eastern Federal University

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Sphere of interest: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Phone: 89020644321

E-mail: vrp261200@mail.ru

ORCID: 0009-0005-4939-2281

