

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВКИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С ПОДВОДНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВЫХ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

А.Ю. Коноплин, П.А. Пятавин

В статье предложен новый метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов (НПА), оснащенных многозвенными манипуляторами (ММ), с подводными стыковочными платформами (СП), которые могут иметь произвольную пространственную ориентацию. Этот метод предполагает захват схватом ММ универсального крепления (штанги), установленного на СП, с последующей стыковкой аппарата за счет автоматического изменения конфигурации манипулятора. При этом с учетом текущего взаимного расположения СП и НПА автоматически формируется желаемая траектория движения схвата манипулятора с его изменяемой ориентацией, обеспечивающая необходимые перемещения корпуса НПА в направлении СП. Поскольку при отработке стыковочной траектории на удерживающийся схват ММ неизбежно будут воздействовать силы и моменты, приводящие к срыву операции стыковки, предложено компенсировать указанные негативные динамические воздействия, рассчитываемые в реальном масштабе времени, с помощью тяг, создаваемых движителями НПА. Результаты численного моделирования в Matlab/Simulink показали работоспособность и эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, автоматическая стыковка, математическая модель, многозвенный манипулятор, подводное базирование, стыковочная платформа

Введение

С развитием технологий автономных и гибридных НПА выдвигаются все более высокие требования к времени их автономной работы, эффективности и стоимости выполнения различных работ. При этом обслуживание подводных добычных комплексов в условиях сложной ледовой обстановки требует использования НПА нового поколения [1], способных долговременно базироваться на специальных подводных станциях, где осуществляются зарядка аккумуляторных батарей аппаратов, а также передача информации, собранной ими в процессе выполнения операций. Такие аппараты способны обеспечивать круглогодичное обследование технических сооружений и трубопроводов без использования судов сопровождения. При этом для расширения функциональных возможностей на эти НПА устанавливают ММ, благодаря которым становятся возможными очистка сооружений от заиливаний и обрастаний,

взаимодействия с манифольдами, измерение катодного потенциала, установка инклинометров и другие манипуляционные операции [2, 3]. Кроме того, при выполнении некоторых аварийно-спасательных операций требуется стыковка НПА с СП, расположенными под произвольными углами к горизонту.

В настоящее время уже разработаны различные системы стыковки НПА с подводными сооружениями, имеющими специализированные СП. В частности, процедура стыковки НПА с СП производится с помощью специальных «ловушек» [4] или посадочных гаков [5], причем каждая «ловушка» совместима только с НПА, для которого она разрабатывалась [6, 7]. Однако реализация этих способов затруднена для крупных НПА, имеющих сложную форму конструкции из-за развитого движительно-рулевого комплекса, оснащения манипуляторами, проботоотборниками и другим габаритным оборудованием.

Важно отметить, что автоматическая стыковка НПА с СП — это сложная задача, требующая реше-

ния проблем, связанных с обнаружением посадочной платформы и точным позиционированием НПА вблизи платформы [8, 9]. Для навигации и приведения НПА к СП в основном используются гидроакустические навигационные системы [10]. Такие системы позволяют подвести аппарат к СП с точностью, достаточной для установления визуального контакта с этой платформой. При этом для позиционирования НПА относительно СП на малых дистанциях необходимо использовать подходы к навигационной привязке, построенные на основе обработки данных, получаемых от бортовых систем технического зрения (СТЗ) [11–13]. По причине инерционности НПА и ограниченной точности систем управления их движителями стыковка аппаратов с помощью создаваемых этими движителями тяг может быть сильно затруднена, особенно в условиях неизвестных и переменных по величине и направлению течений.

Однако если НПА оснащен ММ, то он может автоматически схватиться этим манипулятором за идентифицированное СТЗ специальное крепление (штангу), установленное на СП, после чего становится возможной высокоточная стыковка за счет автоматического изменения конфигурации ММ и согласованного формирования тяг движителей НПА. Поэтому данная статья посвящена разработке нового метода автоматической стыковки НПА с подводной СП с использованием бортового ММ.

Особенности формирования стыковочных траекторий манипулятора НПА

Для стабилизации НПА вблизи СП в режиме зависания, а также пространственных перемещений в процессе стыковки этот аппарат должен иметь развитый движительно-рулевой комплекс, обеспечиваю-

щий управление движением НПА по шести степеням свободы. Установленный на НПА ММ, в свою очередь, должен обладать шестью степенями подвижности для захвата крепления (штанги) и притягивания НПА к СП с любой требуемой пространственной ориентацией. Рассматриваемый в данной работе пример схемы компоновки движителей НПА, оснащенного 6-степенным ММ типа PUMA [14], изображен на рис. 1.

На этом рисунке введены следующие обозначения: $OXYZ$ – абсолютная система координат (СК), в которой перемещается НПА; $CX_C Y_C Z_C$ – жестко связанная с корпусом НПА СК, начало которой совпадает с центром C водоизмещения аппарата, ось CX_C совпадает с продольной осью НПА, ось CZ_C совпадает с вертикальной осью и направлена вниз, а ось CY_C составляет с ними правую тройку; $X_G Y_G Z_G$ – СК, связанная со схватом манипулятора; $q_{1...6}$ – обобщенные координаты ММ; l_{1-6} – длины звеньев ММ; $p_c \in R^3$ – вектор, определяющий положение основания манипулятора относительно центра водоизмещения НПА; T_{1-6} – тяги движителей НПА.

Процедура стыковки НПА начинается с определения пространственного положения и ориентации СП относительно НПА с помощью бортовых СТЗ, в качестве которых могут использоваться многолучевые сонары или стереокамеры. Известные системы [15, 16] позволяют идентифицировать СП на основе облаков точек и сформировать программные сигналы управления НПА для его перемещения в зону стыковки с требуемой пространственной ориентацией. В этом положении (рис. 2, а) в режиме стабилизируемого зависания с помощью вышеуказанных систем идентифицируется универсальная штанга-захват, имеющая заранее известную форму. После чего в СК $CX_C Y_C Z_C$ НПА формируется желаемая траектория

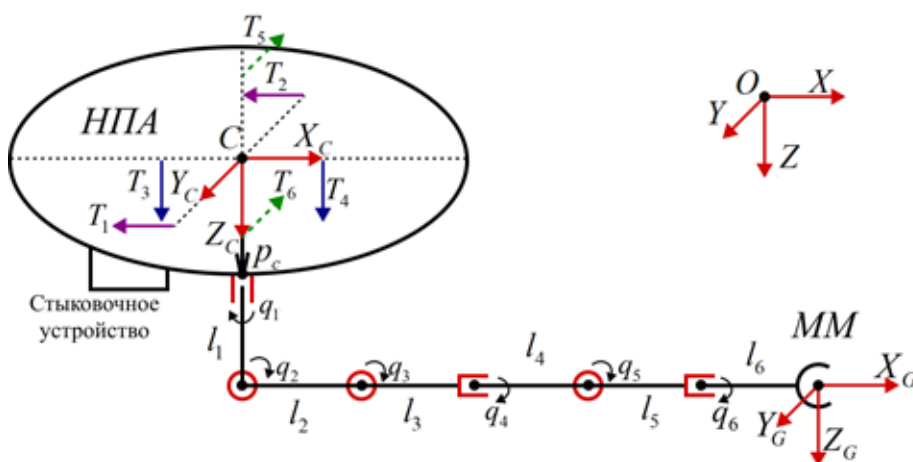


Рис. 1. Пример схемы компоновки движителей НПА, оснащенного ММ

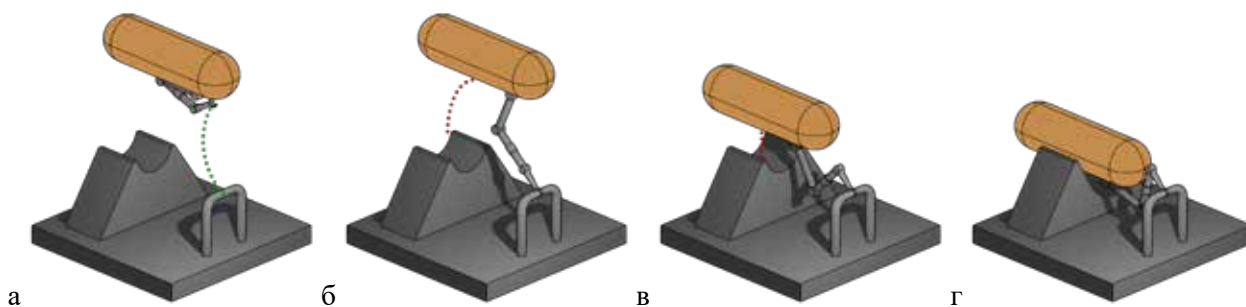


Рис. 2. Процесс стыковки НПА с помощью ММ

движения схвата ММ, обеспечивающая захват штанги (рис. 2, б). Затем с учетом текущего взаимного расположения НПА и СП, которое теперь рассчитывается в реальном масштабе времени путем решения прямой задачи кинематики ММ, строится траектория стыковки аппарата. Эта траектория состоит из двух частей: первая перемещает корпус НПА таким образом, чтобы он оказался напротив стыковочного разъема с требуемой ориентацией (рис. 2, в); вторая обеспечивает прямолинейное сближение НПА для завершения стыковки разъемов (рис. 2, г).

Для точной отработки стыковочной траектории предлагается использовать бортовой ММ. Чтобы сформировать соответствующие сигналы управления приводами степеней подвижности ММ, необходимо пересчитать желаемую траекторию перемещения НПА в траекторию движения схвата манипулятора с учетом его ориентации.

Примем, что после захвата манипулятором штанги (рис. 2, б) в начальной точке стыковочной траектории НПА начала связанной $CX_C Y_C Z_C$ и абсолютной $OXYZ$ СК совпадают. В качестве примера рассмотрим стыковочную траекторию НПА, заданную в СК $OXYZ$ в виде последовательности точек

$C_i \in R^3, (i = \overline{0, n})$, связывающей исходное положение центра водоизмещения C_0 НПА с этой же точкой C_n в пристыкованном положении аппарата (рис. 3). В начальной точке стыковочной траектории НПА положение схвата ММ в СК $CX_C Y_C Z_C$ определяется вектором P_0 , который является началом желаемой траектории движения этого схвата, состоящей из последовательности точек $P_i \in R^3, (i = \overline{0, n})$. Для перемещения корпуса аппарата в текущую точку C_i на стыковочной траектории необходимо, чтобы конфигурация ММ обеспечивала положение его схвата в точке P_i в связанной СК. Таким образом движение схвата манипулятора из начального положения P_0 в точку P_i приведет к параллельному перемещению НПА в противоположном направлении из начальной точки C_0 в точку C_i . В результате текущее желаемое положение схвата ММ будет рассчитываться с помощью выражения:

$$P_i = P_{C_i} = P_0 - C_i. \quad (1)$$

В случае расположения СП в горизонтальной плоскости стыковка НПА производится без изменения ориентации аппарата и, следовательно, без изменения ориентации схвата ММ в процессе его движения по стыковочной траектории.

Для стыковки с наклоненной под углом к горизонту СП желаемая пространственная ориентация НПА должна обеспечиваться тягами его движителей. Эти тяги формируются следящими по угловым положениям системами стабилизации [17] на основе информации, получаемой от бортовых гироскопов НПА. В этом случае необходимо дополнительно корректировать стыковочную траекторию и текущую ориентацию схвата ММ для компенсации смещений, вызванных отклонением корпуса НПА от своего горизонтального положения. На рис. 4 приведен пример указанной коррекции стыковочной траектории, расположенной в плоскости OXZ , с учетом поворота корпуса НПА на угол φ дифферента. Совпадающий с осью X_G СК $X_G Y_G Z_G$ желаемый единичный вектор

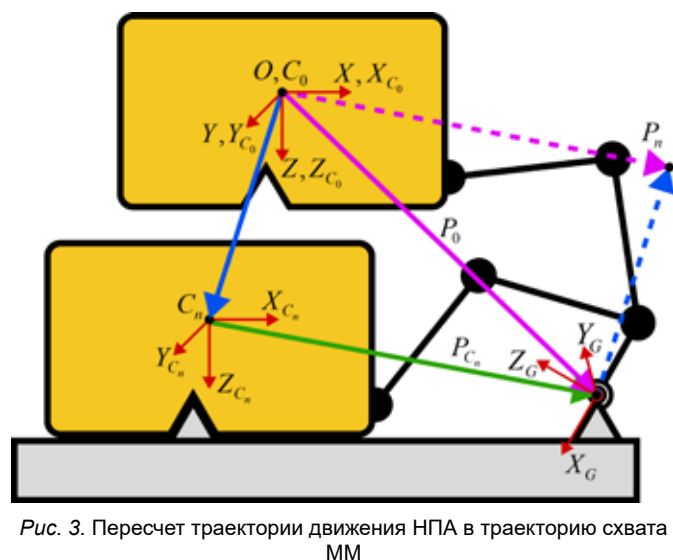


Рис. 3. Пересчет траектории движения НПА в траекторию схвата ММ

создаваемой составляющей угловой скорости ω_k , направленной вдоль продольной оси звена k ; $(\times)$ – векторное произведение векторов.

Однако в случае фиксации схвата ММ на неподвижной штанге СП при решении ОЗД точка зацепления схвата должна рассматриваться как основание манипулятора, а корпус НПА будет считаться дополнительным звеном-аппаратом (рис. 5). На этом рисунке введены следующие обозначения, отличные от рис. 1: $X_0Y_0Z_0$ – СК, связанная с неподвижно закрепленным схватом ММ; $X_{1...6}Y_{1...6}Z_{1...6}$ – СК, построенные с помощью модификации подхода Денавита–Хартенберга [20] и связанные с началами звеньев ММ; $F_C, M_C \in R^3$ – силы и моменты, действующие на центр водоизмещения НПА; $F_G, M_G \in R^3$ – силы и моменты, возникающие в точке зацепления схвата ММ и штанги СП.

Таким образом, при решении ОЗД для зафиксированного схвата манипулятора НПА последовательно, начиная со схвата и заканчивая корпусом НПА, рассчитываются скорости и ускорения движения звеньев ММ. При этом линейная v_C и угловая ω_C скорости движения центра величины НПА определяются с помощью рекуррентных соотношений [19] на основе выражений для звена h :

$$\begin{aligned} v_h &= A_h^{h-1}(v_{h-1} + \omega_{h-1} \times p_{h-1}^*); \\ \omega_h &= A_h^{h-1}\omega_{h-1} + e_h \cdot \dot{q}_h; \\ v_C &= A_C^h(v_h + \omega_h \times p_C^*); \\ \omega_C &= A_C^h\omega_h, \end{aligned}$$

где p_C^* – вектор, соединяющий начало звена h и центра величины C НПА; A_C^h – матрица пересчета векторов из СК звена k в СК НПА; $e_h = (0 \ 0 \ 1)^T$ – единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира h ; q_h – обобщенная координата h ММ.

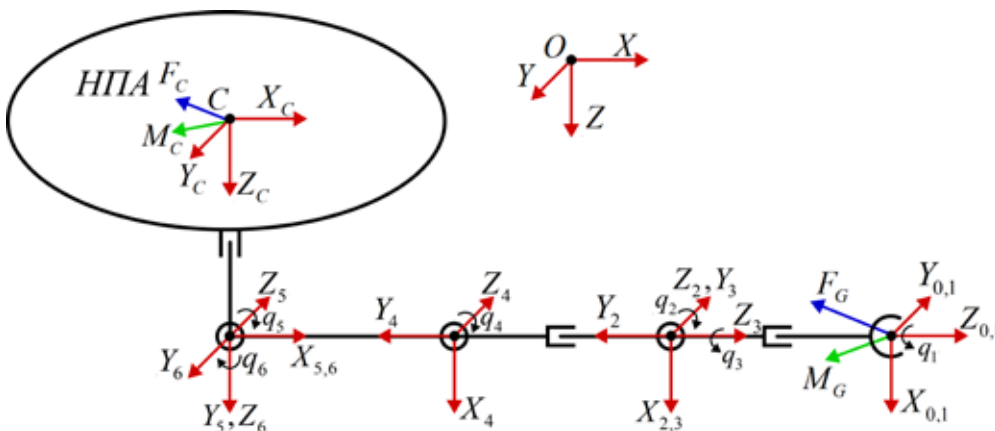


Рис. 5. Схема расположения СК звеньев ММ для решения ОЗД в случае зафиксированного схвата

На основе описания динамической модели НПА [21] вычисляются силы и моменты F_C, M_C , действующие на центр водоизмещения НПА:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_c;$$

$$\tau_c = \begin{bmatrix} F_C \\ M_C \end{bmatrix}; v_c = \begin{bmatrix} v_C \\ \omega_C \end{bmatrix},$$

где $M \in R^{6 \times 6}$ – матрица присоединенных масс жидкости и инерции НПА; $C \in R^{6 \times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил; $D \in R^{6 \times 6}$ – матрица гидродинамического сопротивления; $g \in R^6$ – вектор гравитационных и выталкивающих сил.

Рассчитанные величины F_C, M_C подставляются в описанный выше рекуррентный алгоритм решения ОЗД, и в результате выражения для вычисления сил и моментов в точке крепления ММ к НПА принимают вид:

$$\begin{aligned} F_h &= A_h^C F_C + (m_h + \Pi_{mh})\ddot{r}_{mh} + F_{RLh} + F_{Rph}; \\ M_h &= A_h^C M_C + p_C \times (A_h^C F_C) + r_h^* \times (m_h \ddot{r}_{mh}) + \\ &+ r_{ph} \times (\Pi_{mh} \ddot{r}_{mh}) + (\tau_h + T_h)\dot{\omega}_h + \\ &+ \omega_h \times ((\tau_h + T_h)\omega_h) + M_{Rph} + M_{Lh}. \end{aligned}$$

В процессе последующего решения ОЗД вычисляются моменты, действующие на выходной вал редуктора каждого из электроприводов манипулятора, а также силы F_G и моменты M_G , возникающие в точке зацепления схвата ММ и штанги СП:

$$F_G = F_1, M_G = M_1.$$

Для компенсации вычисленных силовых и моментных воздействий в точке фиксации схвата ММ движителями НПА должны создаваться результирующие сила $F_m \in R^3$ и момент $M_m \in R^3$, которые можно рассчитать с помощью выражений:

$$\begin{aligned} F_m &= -(A_C^G F_G); \\ M_m &= -(A_C^G M_G - J \times (A_C^G F_G)), \end{aligned}$$

где A_C^G – матрица пересчета векторов из СК схвата в СК НПА; J – вектор текущего положения схвата ММ относительно центра величины НПА C .

С помощью комбинированной системы стабилизации НПА [17] с учетом схемы компоновки движителей формируются дополнительные сигналы

управления этими двигателями, обеспечивающие близость реальных компенсирующих сил и моментов рассчитанным значениям величин F_m и M_m . При этом на основе информации об углах курса, крена и дифферента НПА, измеряемых бортовыми гироскопами, замкнутый контур этой системы позволяет сохранять заданную пространственную ориентацию аппарата в процессе стыковки.

Кроме того, для компенсации действующих на выходные валы электроприводов ММ внешних моментов (хоть и незначительных) могут использоваться самонастраивающиеся корректирующие устройства [22], обеспечивающие требуемые показатели качества их работы даже в условиях изменения величин сухого и вязкого трения в этих приводах.

■ Исследование предложенного метода с помощью численного моделирования

Для исследования разработанного метода с помощью численного моделирования была использована среда Matlab/Simulink, в которой была реализована апробированная модель НПА с ММ, схема компоновки двигателей которого приведена на рис. 1. Основные параметры НПА и ММ приведены в таблице, а полное описание параметров и характеристик модели приведено в работе [15].

Для проведения моделирования процедуры стыковки НПА с СП, расположенной в горизонтальной плоскости, была сформирована траектория движения корпуса НПА, имитирующая сближение с СП вплоть до точки контакта (рис. 6). В процессе моделирования с использованием предложенного метода за счет изменения конфигурации манипулятора НПА успешно перемещался по заданной стыковочной траектории со средней скоростью 0.1 м/с и коснулся СП в заданной точке спустя 10 секунд после начала движения.

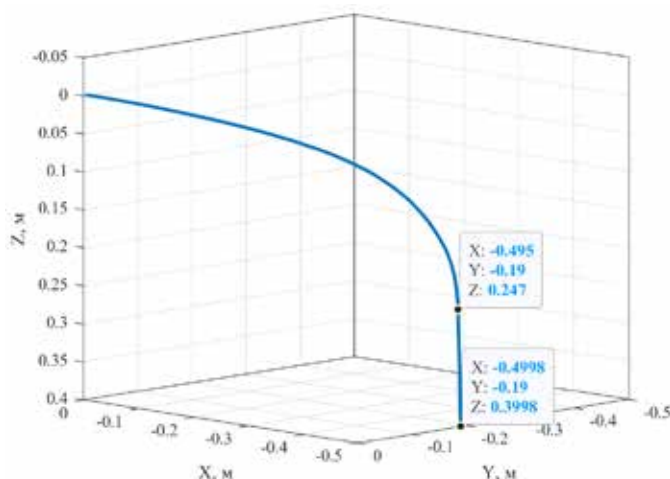


Рис. 6. Стыковочная траектория движения НПА

Параметры НПА и ММ

	Параметры	Величины
НПА	Масса, кг	170
	Д × Ш × В, м	1.2 × 1.5 × 0.9
Звено 1	Масса, кг	0.4
	Длина, м	0.05
Звено 2	Масса, кг	4
	Длина, м	0.5
Звено 3	Масса, кг	4
	Длина, м	0.5
Звено 4	Масса, кг	0.5
	Длина, м	0.15

На рис. 7 показаны графики изменения сил и моментов, действующих в точке зацепления схвата ММ и штанги СП во время движения НПА по стыковочной траектории с использованием только системы управления приводами ММ (без формирования компенсирующих тяг двигателей НПА), а на рис. 8 – графики изменения тех же величин, но при согласо-

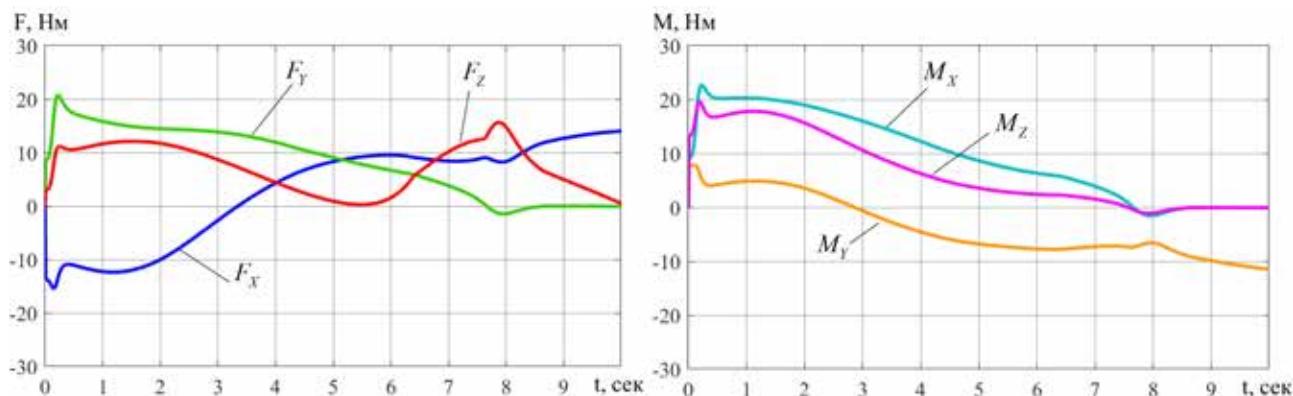


Рис. 7. Графики сил и моментов, действующих в точке зацепления схвата и СП во время движения НПА за счет изменения конфигурации ММ

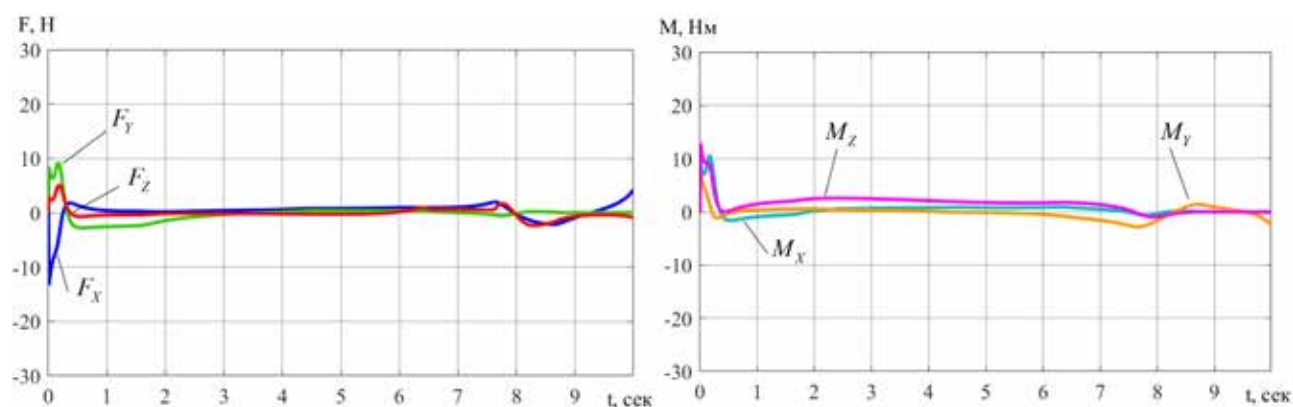


Рис. 8. Графики сил и моментов, действующих в точке зацепления схвата и СП во время движения НПА при согласованном управлении движителями НПА и приводами ММ

ванном управлении движителями НПА и приводами ММ в процессе стыковки.

Графики показывают, что во время выполнения стыковки с помощью предложенного метода согласованного управления движителями НПА и приводами ММ возникающие в точке захвата элементы векторов силы F_G и момента M_G уменьшились до 10 раз на большинстве участков траектории. При этом отклонение центра водоизмещения НПА от стыковочной траектории не превышало 1 см, что позволяет выполнять соединение разъемов, а также обеспечить достаточную точность стыковки аппарата для бесконтактной зарядки аккумуляторных батарей и передачи данных.

Заключение

Результаты выполненного численного моделирования показали, что предложенный в статье метод

позволяет выполнять высокоточную стыковку НПА с СП посредством изменения конфигурации бортового ММ, удерживающегося своим схватом за крепление-штангу СП. Причем за счет согласованного управления тягами движителей НПА в процессе стыковки многократно снижаются негативные силовые и моментные воздействия на наименее грузоподъемные ориентирующие степени подвижности ММ и точку закрепления схвата, что позволяет избежать аварийных ситуаций.

Также следует отметить, что разработанный метод не требует серьезных вычислительных ресурсов и за счет простоты практической реализации он может быть успешно использован для НПА, оснащенных распространенными подводными ММ с типовыми системами управления их приводами.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V., Specific features of a hybrid underwater vehicle motion dynamic model // Underwater Investigation and Robotics. 2021. No. 1(35). P. 18–30.
2. Carrera A., Ahmadzadeh S., Ajoudani A., Kormushev P., Carreras M., Caldwell D. Towards autonomous robotic valve turning // Cybernetics and Information Technologies. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 17–26.
3. Hachicha S., Zaoui C., Dallagi H., Nejim S., Maalej A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning // Ocean Engineering. 2019. Vol. 181. P. 303–313.
4. Yazdani A.M., Sammut K., Yakimenko O.A., Lammas A. A survey of underwater docking guidance systems // Robotics and Autonomous Systems. 2019.
5. Fukasawa T., Noguchi T., Kawasaki T., Baino M. "MARINE BIRD", a new experimental AUV with underwater docking and recharging system // Oceans 2003. Teaming Toward the Future. 2003. Vol. 4. P. 2195–2200.
6. Brighenti A., Zugno L., Mattiuzzo F., Sperandio A. EURODOCKER - A Universal Docking - Downloading Recharging System for AUVs: Conceptual Design Results // OCEANS '98 Conference Proceedings. 1998. Vol. 3.
7. Coulson R., Lambiotte J.C., Grenon G., Pantelakis T., Curran J., An A. Development of a modular docking sub-system for 12 class autonomous underwater vehicles // Oceans '04 MTS/IEEE. 2004. P. 1745–1749.
8. Teo K., An E., Beaujean P. J., A Robust Fuzzy Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Docking Approach for Unknown Current Disturbances // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2012. Vol. 37, No. 2. P. 143–155.
9. Page B.R., Lambert R., Chavez-Galaviz J., Mahmoudian N. Underwater Docking Approach and Homing to Enable Persistent Operation // Front. Robot. AI 8:621755.

10. Evans J., Redmond P., Plakas C., Hamilton K., Lane D. Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation // *Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future*. San Diego, CA, USA, 2003. P. 2201–2210. (IEEE Cat. Vol. 4. No.03CH37492).
11. Li Y., Jiang Y., Cao J., Wang B., Li Y. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 110, Part A. P. 163–173. ISSN 0029-8018.
12. Joe H., Kim J., Son-Cheol Yu. Sensor fusion-based 3d reconstruction by two sonar devices for seabed mapping // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52, No. 21. P. 169–174.
13. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 224. P. 108744. ISSN 0029-8018.
14. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В., Коноплин А.Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // *Подводные исследования и робототехника*. 2018. № 1(25). С. 32–39.
15. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a Control System for Multilink Manipulators on Unmanned Underwater Vehicles Dynamically Positioned Over Seafloor Objects // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1666.
16. Sivčev S., Rossi M., Coleman J., Dooley G., Omerdić E., Toal D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs // *Control Engineering Practice*. 2018. Vol. 74. P. 153–167.
17. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 7. С. 29–34.
18. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1441–1449.
19. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 6. С. 53–56.
20. Popov E.P., Vereshchagin A.F., Zenkevich S.L. Manipulative robots: dynamics and algorithms. Moscow: Nauka, 1978. 398 p.
21. Fossen T.I. Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons Ltd., 1994. 494 p.
22. 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.

Справка об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н., в.н.с.

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.: 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

ПЯТАВИН Павел Алексеевич, научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева
ДВО РАН

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, математические модели динамических систем, информационно-управляющие системы.

Тел.: 89098882900

E-mail: mcmaster988@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0812-808X



Для цитирования:

Коноплин А.Ю., Пятавин П.А. МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВКИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С ПОДВОДНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВЫХ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ // *Подводные исследования и робототехника*. 2024. № 2 (48). С. 38–47. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_05. EDN: OYBSUU.

METHOD OF AUTOMATIC DOCKING OF UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES WITH UNDERWATER PLATFORMS USING ONBOARD MULTI-LINK MANIPULATORS

A.Yu. Konoplin, P.A. Piatavin

The article proposes a new method for automatic docking of uninhabited underwater vehicles (UUV) equipped with multi-link manipulators (MM) with underwater docking platforms (DP), which can have an arbitrary spatial orientation. This method involves attaching MM grip-tool to a simple mount (rod or beam) that is part of DP, followed by docking the UUV by sequential changing the configuration of the MM. At the same time, taking into account the current relative position of DP and UUV, the desired MM grip-tool movement trajectory with its variable orientation is automatically formed in such way that UUV body perform the necessary movements in the direction of DP. The forces and moments that can lead to the docking operation failure will unavoidably arise at MM grip-tool on performing the docking trajectory. Therefore, it is proposed to compensate these negative dynamic effects, calculated in real time, utilizing UUV thrusters. The results of numerical simulation in Matlab/Simulink have shown the efficiency and effectiveness of the proposed method.

Keywords: uninhabited underwater vehicle, automatic docking, mathematical model, multi-link manipulator, underwater basing, docking platform.

References

1. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V., Specific features of a hybrid underwater vehicle motion dynamic model. *Underwater Investigation and Robotics*. 2021. No. 1(35). P. 18–30.
2. Carrera A., Ahmadzadeh S., Ajoudani A., Kormushev P., Carreras M., Caldwell D. Towards autonomous robotic valve turning. *Cybernetics and Information Technologies*. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 17–26.
3. Hachicha S., Zaoui C., Dallagi H., Nejim S., Maalej A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 181. P. 303–313.
4. Yazdani A.M., Sammut K., Yakimenko O.A. et al., A survey of underwater docking guidance systems. *Robotics and Autonomous Systems* (2019).
5. Fukasawa T., Noguchi T., Kawasaki T., Baino M., “MARINE BIRD”, a new experimental AUV with underwater docking and recharging system. *Oceans 2003, Teaming Toward the Future*, 2003, pp. 2195-2200 Vol. 4.
6. Attilio Brighenti, Libero Zugno, Fernando Mattiuzzo, Albedo Sperandio. *EURODOCKER - A Universal Docking - Downloading Recharging System for AUVs: Conceptual Design Results*.
7. Coulson R., Lambiotte J.C., Grenon G., Pantelakis T., Curran J., An A., Development of a modular docking sub-system for 12 class autonomous underwater vehicles. *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04*. 2004. P. 1745-1749
8. Teo K., An E., Beaujean P. J., A Robust Fuzzy Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Docking Approach for Unknown Current Disturbances. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 143-155, April 2012.
9. Page B.R., Lambert R., Chavez-Galaviz J. and Mahmoudian N. Underwater Docking Approach and Homing to Enable Persistent Operation. *Front. Robot. AI* 8:621755.
10. Evans J., Redmond P., Plakas C., Hamilton K., Lane D., “Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation,” *Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future* (IEEE Cat. No.03CH37492), San Diego, CA, USA, 2003, pp. 2201-2210 Vol.4.
11. Ye Li, Yanqing Jiang, Jian Cao, Bo Wang, Yiming Li, AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras, *Ocean Engineering*, Vol. 110, Part A, 2015, P. 163-173, ISSN 0029-8018.
12. Joe H., Kim J., Son-Cheol Yu, “Sensor fusion-based 3d reconstruction by two sonar devices for seabed mapping.” *IFAC-PapersOnLine*, 2019; vol. 52, no. 21, pp. 169-174.
13. Tianlei Wang, Qichao Zhao, Canjun Yang, Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system, *Ocean Engineering*, Vol. 224, 2021, 108744, ISSN 0029-8018.
14. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V., Konoplin A.Yu. Razrabotka metoda formirovaniya programmnyh signalov upravleniya manipulyatorami, ustanovlennymi na podvodnyh apparatah. *Underwater Investigation and Robotics*. 2018. No. 1(25). P. 32-39.
15. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a Control System for Multilink Manipulators on Unmanned Underwater Vehicles Dynamically Positioned Over Seafloor Objects. *Applied Sciences*. 2022; 12(3):1666.
16. Sivčev S., Rossi M., Coleman J., Dooly G., Omerdić E., Toal D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs. *Control Engineering Practice*. 2018. Vol. 74. P. 153–167.
17. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Sistema avtomaticheskoy stabilizatsii podvodnogo apparata v rezhime zavisaniya pri rabotayushchem mnogozvennom manipulyatore. *Chast' 2. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. No. 7. pp. 29-34.
18. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle. *Procedia Engineering*. Vol. 100, 2015. pp. 1441-1449

19. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Sistema avtomaticheskoy stabilizatsii podvodnogo apparata v rezhime zavisaniya pri rabotayushchem mnogozvennom manipulyatore. Chast' I. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2014. №6. pp. 53-56.

20. Popov, E. P.; Vereshchagin, A. F.; Zenkevich, S. L. Manipulative robots: dynamics and algorithms; Nauka: Moscow, Russia, 1978; pp. 398.

21. Fossen, T.I. Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.

22. 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.

About the authors

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

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

Research interests: 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

PIATAVIN Pavel Alexeyevich, scientific researcher

Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of
RAS

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

Research interests: automatic control of underwater robots and
manipulators, mathematical models of dynamic systems, infor-
mation and control systems

Phone: 89098882900

E-mail: mcmaster988@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0812-808X

Recommended citation:

Konoplin A.Yu., Piatavin P.A. METHOD OF AUTOMATIC DOCKING OF UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES WITH UNDERWATER PLATFORMS USING ONBOARD MULTI-LINK MANIPULATORS // Подводные исследования и робототехника. 2024. No. 2 (48). P. 38–47. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_05. EDN: OYBSUU.

