

Научная статья

УДК 629.58

DOI: 10.31857/S0869769824030091

EDN: IRZTJH

Особенности выполнения технологических операций с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащаемых многозвенными манипуляторами

В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев✉, А.А. Тимошенко

Владимир Федорович Филаретов

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
filaretov@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8900-8081>

Александр Валерьевич Зуев

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия;
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
zuev@dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0934-6222>

Александр Алексеевич Тимошенко

научный сотрудник
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия;
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
timoshenko.aal@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1356-9602>

Аннотация. Описан новый обобщенный подход к выполнению подводных контактных (технологических) операций в полностью автоматическом режиме с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащенных многозвенными манипуляторами. Данный подход предполагает использование специального корпуса подводного аппарата, обеспечивающего его высокую мобильность и удобное управление по всем шести степеням свободы, а также пассивную стабилизацию по вертикали при выполнении контактных операций с помощью шестистепенного манипулятора. Предложенный новый метод идентификации присоединяемых к движущимся звеньям манипулятора масс и моментов инерции жидкости, а также коэффициентов вязкого трения позволяет определить внешние моменты в сочленениях манипулятора, обеспечивающие точное силовое воздействие его рабочего инструмента на объекты работ. Поддержание этого заданного воздействия обеспечивается специальной системой стабилизации положения и ориентации аппарата в заданной точке пространства,

а также текущими тягами его движителей с учетом фактической конфигурации манипулятора. Предлагаемые методы, а также синтезированные на их основе устройства и системы с элементами искусственного интеллекта частично уже апробированы на наземных и подводных робототехнических комплексах, что гарантирует их успешное использование при создании манипуляционных автономных подводных аппаратов нового поколения.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, многозвенный манипулятор, позиционно-силовое управление, технологические операции

Для цитирования: Филаретов В.Ф., Зуев. А.В., Тимошенко А.А. Особенности выполнения технологических операций с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащаемых многозвенными манипуляторами // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 3. С. 165–177.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824030091>

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-19-00218.

Original article

Features of performing technological operations using autonomous underwater vehicles equipped with multi-link manipulators

V.F. Filaretov, A.V. Zuev, A.A. Timoshenko

Vladimir F. Filaretov,

Doctor of Sciences in Technique, Professor, Laboratory Head
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
filaretov@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8900-8081>

Aleksandr V. Zuev

Doctor of Sciences in Technique, Associate Professor, Leading Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev, FEB RAS, Vladivostok, Russia
zuev@dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0934-6222>

Aleksandr A. Timoshenko

Researcher
Institute of Marine Technology Problems named after Academician M.D. Ageev, FEB RAS, Vladivostok, Russia
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
timoshenko.aal@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1356-9602>

Abstract. The article describes a new generalized approach to performing underwater contact (technological) operations in fully automatic mode using autonomous underwater vehicles equipped with multi-link manipulators. This approach involves the use of a special hull of the underwater vehicle, ensuring its high mobility and convenient control over all six degrees of freedom, as well as passive vertical stabilization when performing contact operations using a six-degree manipulator. The proposed new method for identifying the added masses and moments of inertia of the liquid attached to the moving links of the manipulator, as well as the coefficients of Coloumb friction,

allows us to determine the external moments in the joints of the manipulator, providing an accurate force effect of its working tool on the objects of work. The maintenance of this predetermined effect is provided by a special system for stabilizing the position and orientation of the device at a given point in space, as well as the current thrust of its thrusters, taking into account the current configuration of the manipulator. The proposed methods, as well as devices and systems synthesized on their basis with elements of artificial intelligence, have already been partially tested on land and underwater robotic complexes, which guarantees their successful use in the creation of manipulative autonomous underwater vehicles of a new generation.

Keywords: autonomous underwater vehicle, multi-link manipulator, position-force control, technological operations

For citation: Filaretov V.F., Zuev A.V., Timoshenko A.A. Features of performing technological operations using autonomous underwater vehicles equipped with multi-link manipulators. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(3):165–177. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824030091>

Funding. The work was carried out with the financial support of Russian Science Foundation N 24-19-00218.

Введение

Для увеличения эффективности использования подводных роботов необходимо значительно расширять их функциональные возможности, не ограничиваясь решением простейших задач и операций. Сейчас многие подводные работы и операции на больших глубинах по-прежнему выполняются только с помощью оснащенных многозвенными манипуляторами (ММ) малопроизводительных обитаемых или телеуправляемых аппаратов [1, 2], требующих наличия дорогостоящего вспомогательного и сопутствующего оборудования, многочисленного высококвалифицированного персонала и специализированных судов. При этом применение существующих автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), пока не оснащаемых ММ, ограничивается выполнением только относительно простых поисковых и обзорных миссий [3, 4]. То есть автоматическое выполнение сложных (в том числе силовых) работ и операций, реализуемых вблизи подводных сооружений и объектов в заранее неизвестной и непрерывно меняющейся обстановке при наличии неизвестных по величине и направлениям подводных течений, для АНПА без ММ пока не доступно [5]. Это сильно сдерживает процесс реального практического освоения морского шельфа и глубин океанов.

Традиционное малоэффективное применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [1, 2] уже показало свою финансовую несостоятельность, в том числе и с учетом их низкой надежности, высокой сложности и громоздкости конструкций, включающих крупногабаритные лебедки и коммутационные блоки, соединенные толстыми бронированными кабельными линиями, а также постоянно запутывающиеся и рвущиеся легкие кабели, соединяющие коммутационные блоки с ТНПА, которые к тому же сильно мешают их перемещениям (особенно при больших подводных течениях). Впервые о значительной востребованности АНПА с ММ указывалось в работе [6], но общий уровень развития подводной робототехники, ее приборной и исполнительной базы, а также компьютерной техники еще совсем недавно не давал возможности реально приступить к созданию этой новой техники.

Однако в последнее время качественный уровень и состав бортового оборудования АНПА резко повысился, поэтому в возникших условиях во многих странах приступили [7, 8] к исследованию возможностей создания АНПА с ММ, способных выполнять различные (даже сложные силовые) операции в полностью автономном режиме зависания вблизи объектов работ (ОР). В частности, были созданы высокоточные адаптивные и робастные системы управления (СУ) движением АНПА [9] и подводных ММ [10], формирования траекторий и режимов движения этих роботов [9, 11], точной стабилизации АНПА над ОР в процессе пространственного перемещения ММ [9] и др. За рубежом появились результаты теоретических исследований (University of Cassino and Southern Lazio, Италия) по вопросам управления АНПА с ММ [12] и создания АНПА «Girona500» и «Girona1000» с ММ и лазерными системами технического зрения (СТЗ) (University of Girona, Испания) [8, 13, 14]. В России также начаты технические разработки новых типов АНПА с ММ (НПП ПТ «Океанос» совместно с СПбГМТУ, а также ИПМТ ДВО РАН).

Тем не менее пока в публикациях не появились сведения об успешном выполнении конкретных подводных технологических операций (особенно силовых) существующими АНПА с ММ в полностью автономном режиме. Во многом это обусловлено тем, что указанные типы подводных роботов являются одними из самых сложных объектов управления среди известных. Основная сложность выполнения любых контактных операций под водой заключается в необходимости обеспечения точного силомоментного взаимодействия рабочих инструментов (РИ) ММ с ОР в режиме зависания АНПА над ними в условиях неизвестных по величине и направлению подводных течений и неопределенности (изменчивости) окружающей обстановки (среды).

Для точной передачи усилий на РИ АНПА с ММ должны оснащаться высококачественными позиционно-силовыми СУ, учитывающими все эффекты взаимодействия АНПА и звеньев ММ с внешней вязкой средой. То есть эти СУ должны обеспечивать не только точные перемещения РИ ММ по непрерывно формируемым сложным пространственным траекториям вдоль подводных объектов, но и одновременно создавать требуемое по величине и направлению силовое воздействие со стороны этих РИ на ОР. При этом все работы должны выполняться в режиме точной стабилизации положения и ориентации АНПА в заданной точке пространства при неизвестных по величине и направлению подводных течений.

Проведенный анализ показывает, что типовые и хорошо отработанные позиционно-силовые СУ промышленными ММ [11, 15, 16] не могут напрямую быть использованы для выполнения указанных подводных операций. Во-первых, они предназначены для ММ, закрепленных на неподвижном основании, в то время как АНПА в режиме зависания может свободно перемещаться по всем шести степеням свободы. Во-вторых, они не учитывают нелинейное и переменное силовое взаимодействие звеньев движущегося ММ с вязкой средой, которое заранее определить невозможно.

Ранее уже делались попытки создания позиционно-силовых СУ манипуляционными АНПА. В работах [17] и [18] эти СУ предлагается строить на основе теории систем с переменной структурой. Для создания силового воздействия РИ на ОР в [17] используется оценка этого воздействия без применения силомоментных датчиков. Но общим недостатком созданных СУ является неучет реальных параметров взаимодействия звеньев ММ с вязкой средой (особенно присоединенных масс и моментов инерции окружающей жидкости), что приводит к большим ошибкам управления.

Известен способ позиционно-силового управления манипуляционным АНПА¹ в режиме его стабилизации над ОР с помощью СТЗ и гироскопических датчиков, который предлагает формировать желаемый вектор силового воздействия со стороны РИ на ОР за счет одновременной подачи управляющих воздействий на все приводы ММ. Но в этом способе не показывается, во-первых, как учесть изменяющиеся при движении звеньев ММ компоненты, связанные с присоединяемыми массами и моментами инерции жидкости, а во-вторых, как точно в реальном масштабе времени компенсировать воздействия на АНПА со стороны ММ во время выполнения им силовых операций с ОР с учетом реальных задержек в получении информации от СТЗ и гироскопических датчиков, а также больших постоянных времени двигателей АНПА. С учетом всех этих факторов неизбежно произойдет неконтролируемое смещение АНПА относительно его стабилизируемого положения и потеря контакта РИ с поверхностью ОР. Последующие попытки СУ автоматически вернуть РИ на программную траекторию движения неизбежно приводят к его циклическим ударам по ОР и поломкам инструментов.

В результате появляется необходимость разработки нового подхода и новых методов построения таких СУ манипуляционными АНПА, которые позволят реально обеспечить автоматическое выполнение РИ ММ различных операций (даже силовых) в режимах зависания АНПА в водной среде вблизи ОР без периодической потери силовых контактов с этими ОР. Проведенный анализ показал, что для успешного решения этой важной проблемы сейчас созданы все предпосылки, поскольку многие отдельные теоретические проблемы построения позиционно-силовых СУ манипуляционных АНПА с учетом имеющихся возможностей современного бортового оборудования уже решены.

¹ Способ позиционно-силового управления подводным аппаратом с многозвенным манипулятором для выполнения контактных манипуляционных операций с подводными объектами: пат. РФ № 2789510 / Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А.; опубл. 06.02.2023.

1. Постановка задачи

В настоящей статье ставится и решается задача создания нового концептуального подхода к синтезу СУ АНПА, оснащаемых ММ, которые предназначены для выполнения подводных технологических операций (в том числе силовых) и миссий в полностью автоматическом режиме зависания в водной среде при непрерывном изменении заранее неизвестной окружающей обстановки и параметров этой среды. В рамках этого обобщенного подхода должны быть решены следующие взаимосвязанные подзадачи.

1. Определить наиболее рациональную форму корпуса АНПА и кинематическую схему расположения его движителей (в том числе пространственную ориентацию осей тяг всех движителей, устанавливаемых на корпусе), способные более эффективно обеспечить стабилизацию его положения и ориентации в заданной точке пространства при наличии подводных течений и иных силомоментных возмущений со стороны окружающей среды, а также выявить места закрепления основания ММ на корпусе АНПА, которые в зависимости от решаемых манипуляционных задач должны снизить механические воздействия на эти аппараты при выполнении ими заданных манипуляционных операций (включая силовые) в вязкой среде, значительно упрощая решение задач стабилизации и управления манипуляционным АНПА.

2. Разработать методы точной идентификации в реальном масштабе времени параметров взаимодействия окружающей вязкой среды и движущихся в указанной среде звеньев ММ, включая присоединенные массы и моменты инерции окружающей жидкости, а также гидродинамические параметры этой жидкости, которые невозможно определить и задать заранее.

3. Разработать новые методы синтеза адаптивных и робастных СУ, обеспечивающих автоматическую стабилизацию положения и ориентации АНПА в заданной точке пространства с помощью его движителей при перемещении РИ ММ в водной среде (в том числе и при проведении силовых операций в режимах позиционно-силового управления) при наличии неизвестных по величине и направлениям подводных течений.

4. Разработать метод синтеза комбинированных позиционно-силовых СУ электроприводами ММ, обеспечивающих точное перемещение РИ ММ по любым пространственным траекториям с одновременным созданием желаемого по величине и направлению силового воздействия со стороны РИ на ОР, как при фиксации АНПА вблизи этих ОР, так и при их зависании в водной среде вблизи указанных объектов.

5. Создать структуру эффективной информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС), обеспечивающей эффективное взаимодействие всех блоков и подсистем манипуляционного АНПА, задействованных при выполнении этим аппаратом формируемых на его борту технологических операций в рамках заданных миссий.

В данной работе из-за ограниченного объема публикации в основном будет описан только новый общий концептуальный подход к синтезу создаваемой информационно-измерительной и управляющей системы для АНПА, оснащаемых ММ, и ее главных составных частей, которые предназначены для выполнения силовых подводных технологических операций и работ в полностью автоматическом режиме зависания этих АНПА в водной среде при непрерывных изменениях заранее неизвестной окружающей обстановки и параметров этой среды. Детальные решения описанных выше подзадач и их практическая реализация будут представлены в последующих публикациях авторов, включая готовящуюся монографию.

2. Описание особенностей конструкции и кинематической схемы манипуляционного АНПА

Существующие в настоящее время формы корпусов и кинематические схемы расположения движителей АНПА позволяют решать только типовые задачи поиска подводных объектов и наблюдения на них [3, 4]. Они не могут обеспечивать эффективную и точную стабилизацию положений и ориентации АНПА в заданной точке подводного пространства вблизи ОР при наличии произвольных и непрерывно изменяющихся подводных течений и иных возмущений окружающей вязкой среды. А отсутствие рабочих механизмов – ММ,

а также их правильного расположения на корпусах АНПА резко ограничивает функциональные возможности и области использования этой подводной техники. Эффективное решение задачи создания рациональной формы АНПА, а также кинематических схем и мест расположения их двигателей и ММ, минимизирующих энергетические затраты и ошибки стабилизации носителей при выполнении различных подводных технологических операций с различными объектами, является новой и важной научной-технической задачей подводной робототехники. Ее решение описывается далее.

Для точного выполнения под водой любых манипуляционных технологических операций (в том числе контактных) АНПА должен иметь компоновку двигателей, которая обеспечит его управление сразу по всем шести степеням свободы. Пример такой компоновки показана на рис. 1, где на каждой оси системы координат (СК) $SX_cY_cZ_c$ симметрично расположены по паре двигателей P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 и P_6 и, силы тяги которых направлены перпендикулярно соответствующим осям этой СК. Для обеспечения большей остойчивости АНПА точка D крепления основания ММ располагается на оси Z_c под центром величины C его корпуса.

Так как чаще всего при выполнении силовых манипуляционных операций АНПА будет зависать над ОР, то основное силовое и моментное воздействие РИ ММ на этот ОР, как правило, будет направлено вдоль оси Z_c . Поэтому для максимального демпфирования этих воздействий корпус АНПА желательно изготавливать симметричным относительно его главной вертикальной оси, в виде эллипсоида, сплюсненного вдоль этой оси, а проекция этого корпуса на плоскость SX_cY_c должна иметь форму круга. Такая форма корпуса обеспечивает дополнительную пассивную остойчивость АНПА по вертикальной оси, но при этом сохраняет его хорошую подвижность в горизонтальной плоскости.

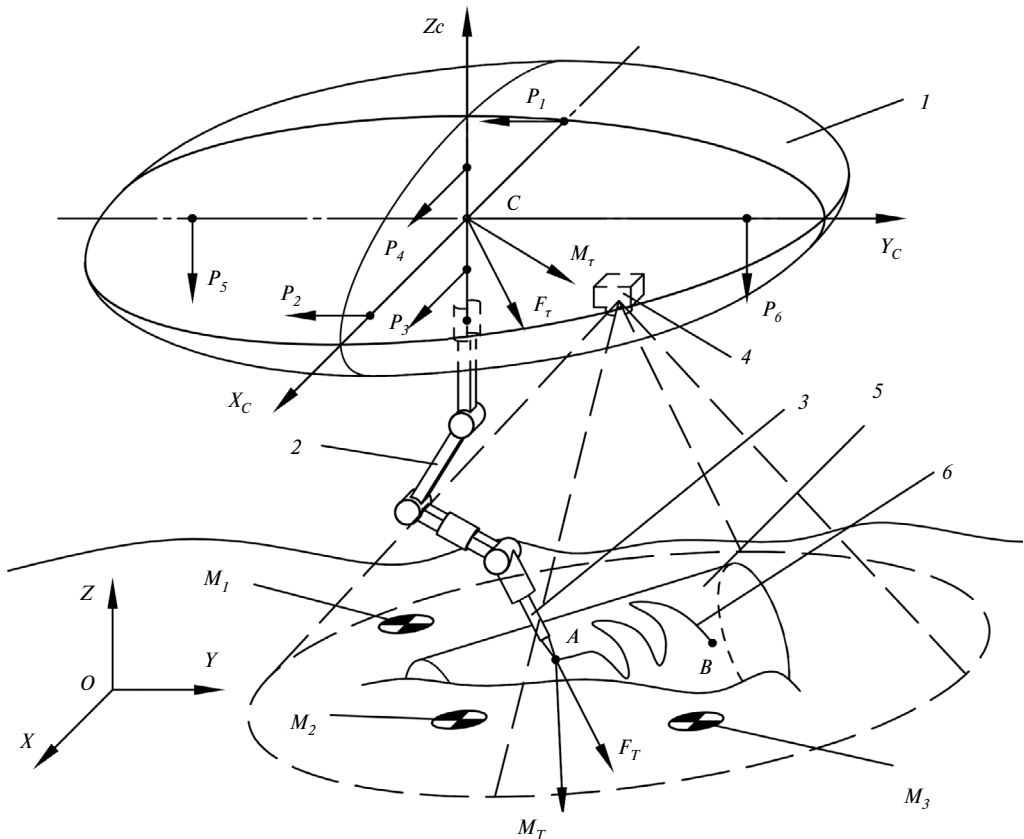


Рис. 1. Обобщенная схема манипуляционного АНПА для автоматического выполнения силовых подводных операций. 1 – корпус АНПА, 2 – ММ, 3 – РИ ММ, 4 – СТЗ, 5 – ОР, 6 – рабочая траектория движения РИ ММ

Кинематическая схема ММ, как и корпус, имеет шесть степеней свободы, три из которых переносные и три – ориентирующие. Такая схема ММ дает возможность его РИ обрабатывать любую пространственную ориентацию векторов силового F_T и моментного M_T воздействий на ОР в рабочей зоне ММ.

Для автоматического построения траекторий движения РИ относительно поверхности ОР и визуальной привязки АНПА к некоторой точке водного пространства в его передней части располагается СТЗ, которая для расширения рабочей области ее видимости имеет две взаимно перпендикулярные оси вращения.

Ниже кратко будет изложен предлагаемый новый концептуальный подход к автоматическому выполнению силовых манипуляционных операций с помощью описанной конструкции АНПА с ММ, зависающего над ОР.

3. Описание подхода к автоматическому выполнению силовых операций в водной среде с помощью манипуляционного АНПА в режиме его зависания над объектами работ

Предлагаемый подход реализуется в несколько этапов² с помощью уже созданной при участии авторов данной статьи многоуровневой ИИУС [19]. Обобщенная структурная схема этой ИИУС показана на рис. 2. В дальнейших работах будет детально описан состав всех ее уровней и модулей, режимы их взаимодействия и работы, а также содержание сообщений, которыми они обмениваются в процессе работы всего комплекса.

На первом этапе подхода, в начале выполнения очередной рабочей миссии, сформированной на стратегическом уровне ИИУС, осуществляются поиск и наведение АНПА на ОР с использованием бортовых навигационных и гидролокационных систем. Для поиска ОР в заданной акватории в *подсистеме формирования траекторий движения АНПА* тактического уровня ИИУС определяется траектория движения этого АНПА в виде серии галсов, покрывающих всю площадь обследуемой акватории [3]. При перемещении АНПА по этой траектории его бортовыми гидролокаторами бокового обзора осуществляется съемка поверхности дна с одновременным распознаванием получаемых гидролокационных картинок в *подсистеме обработки изображений* тактического уровня ИИУС прямо на борту АНПА. После обнаружения искомого ОР *подсистемой управления АНПА* исполнительного уровня ИИУС обеспечивается подход АНПА к этому объекту и зависание в водном пространстве над ним с использованием *подсистемы стабилизации* также исполнительного уровня ИИУС [11] так, чтобы ОР (или его часть) располагался одновременно и в рабочей области ММ, и в области видимости СТЗ АНПА. При этом точная привязка АНПА (его точки С) к некоторой исходной точке трехмерного водного пространства над ОР с его исходной ориентацией в этом пространстве, осуществляемая *подсистемой стабилизации*, обеспечивается за счет использования специальных маркеров ARUCO или не менее трех обычных маркеров M_1 , M_2 и M_3 (рис. 1), располагаемых на ОР или на дне вблизи него. В качестве таких маркеров также могут выступать особенности конструкции ОР или рельефа дна [20]. После стабилизации АНПА в подводном пространстве над ОР на втором этапе выполнения рабочей миссии в *подсистеме обработки изображений* ИИУС с помощью СТЗ формируется 3D-модель ОР, для которой на тактическом уровне ИИУС в *подсистеме формирования траекторий движения ММ* в функции времени строятся желаемые траектории перемещения РИ [11, 21], представляемые в памяти управляющего контроллера набором последовательно расположенных точек или в виде аналитического описания сплайнами. Для каждой точки этих траекторий определяется требуемая ориентация РИ в абсолютной СК, а также направление и величина его желаемого силового воздействия на ОР. После этого, решая типовые обратные задачи кинематики [22] для известной конструкции ММ в функции времени, в *подсистеме формирования траекторий движения ММ* определяются и запоминаются желаемые законы изменения во времени всех обобщенных координат ММ для каждой траектории движения

² Способ позиционно-силового управления автономным необитаемым подводным аппаратом с многостепенным манипулятором: пат. РФ № 2799176 / Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Тимошенко А.А.; опублик. 04.07.2023, Бюл. № 19.

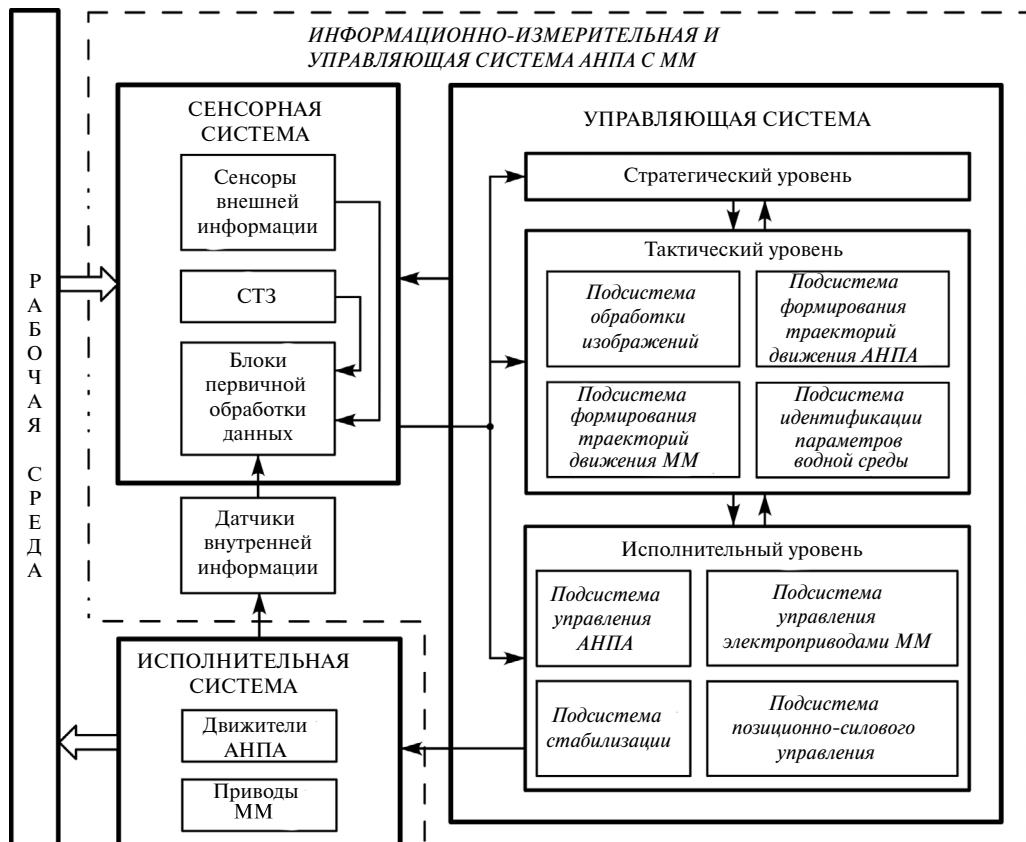


Рис. 2. Обобщенная структурная схема предлагаемой ИИУС АНПА с ММ

его РИ. Кроме того, используя известные рекуррентные соотношения [11, 22], с учетом текущей конфигурации ММ определяются желаемые значения внешних моментов во всех сочленениях ММ и желаемые тяги двигателей АНПА, которые в совокупности создают в каждой точке сформированной траектории желаемые по величине и направлению силу F_T и (или) момент M_T со стороны РИ на ОР.

Последующее точное перемещение РИ по сформированным траекториям с точным силовым F_T и (или) моментным M_T воздействием на ОР предлагается осуществлять за счет использования ранее уже созданных авторами статьи комбинированных позиционно-силовых СУ [11], обеспечивающих одновременную минимизацию ошибок как по положению выходного вала редуктора каждого электропривода ММ, так и по развиваемому им внешнему моменту. Однако для формирования сигналов обратных связей указанных позиционно-силовых СУ необходимо точно знать фактические значения составляющих внешних моментов всех приводов ММ, определяемых воздействиями РИ на ОР.

Эти составляющие удается выделить из суммарных значений соответствующих обобщенных внешних моментов, вычитая из них непрерывно рассчитываемые составляющие взаимовлияний между всеми степенями подвижности ММ с учетом только номинальных значений масс и моментов инерции звеньев ММ, известные моменты от действия гидростатических сил, моменты вязкого трения, а также моменты, обусловленные наличием присоединенных масс и моментов инерции жидкости. При этом, на что уже указывалось выше, реальные значения присоединяемых к звеньям ММ масс и моментов инерции жидкости априорно не известны, но ошибки при задании их значений, как показали предварительные исследования, неизменно приводят к большим ошибкам управления.

Для решения проблемы точной непрерывной идентификации указанных присоединенных масс и моментов инерции жидкости в разрабатываемый подход предлагается ввести

третий этап, на котором перед началом выполнения ММ контактных (силовых) операций с ОР *подсистемой идентификации параметров водной среды* тактического уровня ИИУС должны определяться реальные значения величин этих масс и моментов инерции жидкости, присоединяемых к звеньям ММ при его движении в текущей окружающей водной среде. Поскольку звенья ориентирующих степеней свободы ММ всегда имеют малые размеры, то присоединяемые массы и моменты инерции жидкости определяются только для его двух звеньев, обеспечивающих три переносные степени свободы.

Учитывая, что корпус АНПА на первом этапе выполнения миссии уже зафиксирован в нужном пространстве водной среды с помощью *подсистемы стабилизации* ИИУС, перед выполнением силовых операций РИ ММ задается такое движение по тестовым траекториям, при котором одновременно изменяются обобщенные координаты всех трех переносных степеней свободы ММ. Во время этого движения без контактов с ОР на выходных валах электроприводов каждой из трех переносных степеней свободы ММ начинают действовать обобщенные внешние моменты $N_i(t)$ ($i = 1,3$), обусловленные эффектами взаимовлияния между этими степенями свободы, гидростатическими и гидродинамическими силами сопротивления его движению, включая вязкие трения, а также присоединенными массами и моментами инерции окружающей жидкости, но без силовых взаимодействий РИ ММ с ОР.

Для определения величин моментов $N_i(t)$, скоростей и ускорений изменения соответствующих обобщенных координат ММ в реальном масштабе времени используются наблюдатели с переменной структурой [23]. Затем из полученных для каждого электропривода ММ обобщенных моментов $N_i(t)$ вычитаются составляющие взаимовлияния переносных степеней подвижности друг на друга с учетом масс и моментов инерции только двух указанных звеньев ММ, рассчитываемые аналитически, а также моменты от действия гидростатических сил и сил вязкого трения. Оставшуюся часть обобщенного момента в каждой степени подвижности ММ, обусловленную только наличием неизвестных присоединенных масс и моментов инерции жидкости, представляют в аналитическом виде и преобразуют в линейную регрессионную форму [24] за счет группировки неизвестных параметров относительно известных составляющих. При этом присоединенные массы жидкости задаются в матричном виде [25], учитывающем изменение их величин в зависимости от их текущего расположения относительно набегающего потока жидкости. Затем *подсистемой идентификации параметров водной среды* ИИУС точно определяются неизвестные параметры полученной регрессионной формы с помощью фильтра Калмана [24].

На четвертом этапе предлагаемого подхода, зная текущее расположение точек C и A (с использованием показаний СТЗ) в абсолютной СК, а также исходное расположение ММ в связанной СК $X_c Y_c Z_c$, осуществляется перевод РИ ММ из его исходного положения в точку A рабочей траектории (см. рис. 1). Для этого на входы *подсистемы управления электроприводами ММ* исполнительного уровня ИИУС подаются соответствующие управляющие сигналы, обеспечивая плавный перевод РИ ММ из исходного положения до касания ОР в точке A . Во время этого перевода, непрерывно в реальном масштабе времени решая обратную задачу динамики для ММ по известному рекуррентному алгоритму [9] с учетом ранее идентифицированных присоединенных масс и моментов инерции жидкости, определяются плавно изменяющиеся силовое и моментное воздействия на АНПА со стороны перемещающегося в вязкой среде ММ. Эти воздействия автоматически компенсируются *подсистемой стабилизации* ИИУС за счет плавного изменения тяг соответствующих движителей P_i ($i = 1,6$) АНПА.

Оставшиеся неточности обработки движителями смещений точки C АНПА от ее исходной позиции в пространстве и от горизонтального расположения осей X_c и Y_c , обусловленных силовыми и моментными воздействиями со стороны движущегося ММ, определяются и компенсируются указанной *подсистемой стабилизации* ИИУС при наличии дополнительной информации, получаемой от бортовой навигационной системы и от СТЗ АНПА, которая непрерывно фиксирует смещения его точки C относительно маркеров M_1 , M_2 и M_3 .

Установление контакта РИ с ОР в точке A выявляется тактильным датчиком, устанавливаемым в месте крепления РИ к последнему звену ММ, или иными известными средствами. После контакта РИ с ОР в начальной точке A на пятом этапе подхода осуществляется непосредственное выполнение заданной конкретной силовой технологической операции.

Но силовое движение ММ начинается так, чтобы оно не приводило к смещению АНПА от его исходной точки, поскольку его движители еще не раскручены и не прошли все их переходные процессы. Поэтому вначале, не изменяя текущую конфигурацию ММ, с помощью тяг движителей АНПА в точке A плавно задается исходный вектор силового воздействия F_T (рис. 1). Для этого *подсистемой позиционно-силового управления* исполнительного уровня ИИУС на входы соответствующих движителей АНПА скоординировано подаются программные сигналы, плавно и равномерно изменяющиеся в заданном временном интервале от нуля до их расчетных величин, которые в точке C АНПА формируют вектор F_T и момент M_T тяг, а в точке A при текущей конфигурации ММ – требуемые значения F_T и M_T . Величина указанного временного интервала зависит от величин F_T , M_T и динамических свойств движителей АНПА. Одновременно с подачей сигналов на движители АНПА в том же временном интервале путем типового решения обратной задачи динамики [22] на вход каждого следящего привода соответствующей степени подвижности ММ также равномерно во времени подаются соответствующие программные сигналы, которые, обеспечивая равномерные нарастания внешних моментных воздействий на выходах всех приводов, создают равномерное нарастание силовых и моментных воздействий F_T и M_T на ОР, не позволяя при этом ММ изменять свою исходную (в момент первого контакта его РИ с ОР) конфигурацию.

При этом сам АНПА, опирающийся на манипулятор сверху и представляющий собой неустойчивый перевернутый маятник, сохраняет свое устойчивое положение в пространстве (стабильные положение точки C и ориентацию осей X_c и Y_c) даже при некоторых погрешностях в определении создаваемых силовых и моментных воздействий. Это происходит вследствие создания незначительных дополнительных изменений тяг движителей АНПА, которые обеспечиваются *подсистемой стабилизации АНПА*, устраняя появление со временем даже малых линейных смещений точки C и ориентаций осей X_c и Y_c от их исходных позиций в абсолютной СК. Как уже было сказано ранее, эти малые смещения также определяются с помощью СТЗ и трех маркеров M_1 – M_3 .

Если РИ требуется сместить с заданными F_T и M_T (возможно переменными) по сформированной ранее траектории от точки A к точке B (см. рис. 1), то учитывается факт, что при движении РИ по поверхности ОР на него начинают действовать силы сухого трения и иные силы сопротивления. Для осуществления этого движения в *подсистеме формирования траекторий движения ММ* кроме желаемого вектора силы F_T учитываются и векторы всех указанных сил, определяемых экспериментально до начала рабочих миссий АНПА. В результате формируются уточненные векторы сил и моментов F_T и M_T , которые начинают использовать при переводе РИ из исходной точки A в очередную точку на траектории его движения. Для определения всех векторов при текущей конфигурации ММ по указанным ранее рекуррентным соотношениям [11] рассчитываются новые значения тяги всех движителей АНПА, а также формируются новые значения программных сигналов, подаваемых на все приводы ММ для создания внешних моментов на приводах всех его степеней подвижности.

Перед началом рабочего движения ММ в зависимости от выполняемой программы задается постоянная или переменная скорость перемещения конца его РИ по рабочей траектории от точки A до точки B с уже определенным (возможно переменным) силовым F_T и моментным M_T воздействием этого РИ на ОР. Сформированные для каждой степени подвижности ММ программные значения обобщенных координат, их скоростей и ускорений, а также внешних моментов подаются на входы *подсистемы позиционно-силового управления* [11] всеми электроприводами ММ, которые обеспечивают одновременную минимизацию ошибок как по положению выходного вала редуктора каждого электропривода ММ, так и по развиваемому внешнему моменту. Это обеспечивает точное движение РИ по траектории с его точным силовым воздействием на ОР.

Во время точного движения ММ по рабочей траектории определяются силовые и моментные воздействия, которые движущийся в водной среде ММ оказывает на АНПА в точке его крепления к последнему. Эти воздействия рассчитываются с помощью ранее указанного рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики, но в этом алгоритме уже обязательно используют идентифицированные величины присоединенных масс и моментов инерции жидкости, а также моменты вязкого трения, возникающего при перемещениях

всех звеньев ММ в водной среде, моменты, обусловленные взаимовлияниями между всеми звеньями и степенями подвижности ММ, и значения векторов силы F_T и момента M_T .

Одновременно с движением РИ ММ по траектории обеспечивается не только описанная выше целевая компенсация воздействий со стороны ММ на АНПА с помощью его движителей, которая реально может быть и не совсем точной, но и используется дополнительная стабилизация положения и ориентации АНПА в абсолютной СК с помощью *подсистемы стабилизации АНПА*. Эта подсистема за счет введения с помощью СТЗ отрицательных обратных связей по всем его степеням свободы позволяет минимизировать все погрешности, а также неточности определения и отработки движителями АНПА реальных силовых и моментных воздействий на него со стороны ММ.

Заключение

В настоящей статье предложен новый обобщенный подход к выполнению подводных силовых технологических операций в полностью автоматическом режиме с помощью перспективных манипуляционных АНПА, а также многоуровневых ИИУС. Этот подход предполагает использование специального корпуса АНПА, обеспечивающего его высокую мобильность, остойчивость и удобное управление по всем шести степеням свободы, а также пассивную стабилизацию по вертикали при выполнении контактных операций с помощью многозвенных ММ.

Предложен новый метод идентификации масс и моментов инерции жидкости, присоединяемой к движущимся звеньям ММ, который позволяет формировать внешние моменты во всех сочленениях ММ, обеспечивающие точное силовое воздействие его РИ на объекты работ. Реализация этого воздействия обеспечивается с помощью специальной системы стабилизации положения и ориентации АНПА в заданной точке подводного пространства, а также текущими тягами его движителей с учетом текущей конфигурации ММ.

Детальные решения всех описанных в работе подзадач и их практическая реализация будут представлены в последующих публикациях авторов. Созданная теория обеспечит практическую реализацию АНПА с ММ, который в полностью автоматическом режиме его зависания в водной среде над или вблизи объектов работ с использованием различных СТЗ позволит с помощью РИ ММ выполнять различные реальные технологические операции в полностью неопределенной и непрерывно изменяющейся рабочей среде с препятствиями при наличии неизвестных по величине и направлению подводных течений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Christ R.D., Wernli R.L. The ROV Manual. Elsevier, UK, 2013. 712 p.
2. Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 4–12.
3. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
4. Боровик А.И., Рыбакова Е.И., Галкин С.В., Михайлов Д.Н., Коноплин А.Ю. Опыт использования автономного необитаемого подводного аппарата «ММТ-3000» для исследований бентосных сообществ Антарктики // Океанология. 2022. Т. 62, № 5. С. 811–824.
5. Sahoo A., Dwivedy S.K., Robi P.S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle // Ocean Engineering. 2019. Vol. 181. P. 145–160.
6. Koval E.V. Automatic stabilization system of underwater manipulation robot // Proc. of OCEANS'94 OSATES Conf. Brest, France, 1994. Vol. 1. P. 807–812.
7. Ishitsuka M., Ishii K. Development of an underwater manipulator mounted for an AUV // Proc. of OCEANS2005 MTS/IEEE. Washington, USA, 2005. P. 1–6.

8. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation // Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, Washington, 2015. P. 529–536.
9. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве / под. ред. В. Ф. Филаретова. Владивосток: Дальнаука, 2016. 400 с.
10. Filaretov V., Zuev A., Timoshenko A. A Method for Constructing Adaptive Control Systems for Electric Drives of an Underwater Multi-Link Manipulator // Proc. of the International Russian Automation Conference. Sochi, Russia, 2023. P. 1028–1033.
11. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018. 232 с.
12. Antonelli G. Underwater Robots. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 279 p.
13. Ribas D., Palomer N., Ridao P., Carreras M., Mallios A. Girona 500 AUV: From Survey to Intervention // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012. Vol. 17, N1. P. 46–53.
14. Ribas D., Ridao P., Turetta A., Melchiorri C., Palli G., Fernández J.J., Sanz P.J. I-AUV Mechatronics Integration for the TRIDENT FP7 Project // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2015. Vol. 20, N5. P. 2583–2592.
15. Yoshikawa T. Force control of robot manipulators // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. San Francisco, 2000. P. 220–225.
16. Гориневский Д. М., Формальский А. М., Шнейдер А. Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. М.: Наука, 1994. 350 с.
17. Barbalata C., Dunnigan M. W., Petillot Y. Position/force operational space control for underwater manipulation // Robotics and Autonomous Systems. 2018. Vol. 100. P. 150–159.
18. Dai P., Lu W., Le K., Liu D. Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation // Ocean Engineering. 2020. Vol. 196. P. 106855.
19. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш. Создание универсальной архитектуры распределенного программного обеспечения мехатронного объекта // Программная инженерия. 2012. № 7. С. 14–21.
20. Palomer A., Ridao P., Youakim D., Ribas D., Forest J., Petillot Y. 3D laser scanner for underwater manipulation // Sensors. 2018. Vol. 18, N4. P. 1086.
21. Yukhimets D., Popova O. Method of automatic formation of the underwater manipulator motion program based on noise three-dimensional models // Proc. of the International Conference on Ocean Studies. Vladivostok, Russia, 2023. P. 1–6.
22. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control. Prentice Hall, 2003. 450 p.
23. Жирабок А. Н., Ир К. Ч. Виртуальные датчики в задаче функционального диагностирования нелинейных систем // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2022. № 1. С. 67–75.
24. Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control. Marsel Dekker Inc., 2002.
25. Fossen T.I. Guidance and control of ocean vehicles: Doctors Thesis / University of Trondheim, Norway. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1999. P. 32–47. ISBN0471941131.

REFERENCES

1. Christ R.D., Wernli R.L. The ROV Manual. Elsevier, UK; 2013.
2. Konoplin A. Yu., Denisov V.A., Dautova T.N., Kuznetsov A.L., Moskovtseva A. V. Tekhnologiya ispol'zovaniya TNPA dlya kompleksnogo issledovaniya glubokovodnykh ehkosistem = [The technology of using ROV for a comprehensive study of deep-sea ecosystems]. *Podvodnye Issledovaniya i Robototekhnika*. 2019;30(4):4–12. (In Russ.).
3. Inzartsev A. V., Kiselev L. V., Kostenko V. V., Matvienko Yu. V., Pavin A. M., Shcherbatyuk A. F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primenenie. = [Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications]. Vladivostok: IPMT DVO RAN; 2018. (In Russ.).
4. Borovik A. I., Rybakova E. I., Galkin S. V., Mikhailov D. N., Konoplin A. Yu. Opyt ispol'zovaniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata “MMT-3000” dlya issledovaniya bentosnykh soobshchestv Antarktiki = [The experience of using the MMT-3000 autonomous uninhabited underwater vehicle for research of benthic communities in Antarctica]. *Okeanologiya*. 2022;62(5):811–824. (In Russ.).

5. Sahoo A., Dwivedy S.K., Robi P.S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*. 2019;181:145–160.
6. Koval E.V. Automatic stabilization system of underwater manipulation robot. *Proc. of OCEANS'94 OSATES Conf.* Brest, France; 1994. Vol. 1. P. 807–812.
7. Ishitsuka M., Ishii K. Development of an underwater manipulator mounted for an AUV. *Proc. of OCEANS2005 MTS/IEEE*. Washington, USA; 2005. P. 1–6.
8. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation. *Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, Washington; 2015. P. 529–536.
9. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniya skorostnym dvizheniem i stabilizatsiei podvodnykh apparatov v prostranstve = [Features of the synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space]. Vladivostok: Dalnauka; 2016. 400 p. (In Russ.).
10. Filaretov V., Zuev A., Timoshenko A. A Method for Constructing Adaptive Control Systems for Electric Drives of an Underwater Multi-Link Manipulator. *Proc. of the International Russian Automation Conference*. Sochi, Russia; 2023. P. 1028–1033.
11. Filaretov V.F., Zuev A.V., Gubankov A.S. Upravlenie manipulyatorami pri vypolnenii razlichnykh tekhnologicheskikh operatsii = [Manipulator control when performing various technological operations]. Moscow: Nauka; 2018. (In Russ.).
12. Antonelli G. Underwater Robots. *Springer International Publishing Switzerland*; 2014. 279 p.
13. Ribas D., Palomeras N., Ridao P., Carreras M., Mallios A. Girona 500 AUV: From Survey to Intervention. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2012;17(1):46–53.
14. Ribas D., Ridao P., Turetta A., Melchiorri C., Palli G., Fernández J.J., Sanz P.J. I-AUV Mechatronics Integration for the TRIDENT FP7 Project. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20(5):2583–2592.
15. Yoshikawa T. Force control of robot manipulators. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. San Francisco; 2000. P. 220–225.
16. Gorinevsky D.M., Formalsky A.M., Schneider A. Yu. Upravlenie manipulyatsionnymi sistemami na osnove informatsii ob usiliyakh = [Control of manipulation systems based on information about efforts]. Moscow: Nauka; 1994. 350 p. (In Russ.).
17. Barbalata C., Dunnigan M.W., Petillot Y. Position/force operational space control for underwater manipulation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2018;100:150–159.
18. Dai P., Lu W., Le K., Liu D. Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*. 2020;196:106855.
19. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E. Sh. Sozdanie universal'noi arkhitektury raspredelenного programmного obespecheniya mekhatronного ob"ekta = [Creation of a universal distributed software architecture for a mechatronic object]. *Programmnaya Inzheneriya*. 2012;(7):14–21. (In Russ.).
20. Palomer A., Ridao P., Youakim D., Ribas D., Forest J., Petillot Y. 3D laser scanner for underwater manipulation. *Sensors*. 2018;18(4):1086.
21. Yukhimets D., Popova O. Method of automatic formation of the underwater manipulator motion program based on noise three-dimensional models. *Proc. of the International Conference on Ocean Studies*. Vladivostok: Russia; 2023. P. 1–6.
22. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control. Prentice Hall; 2003.
23. Zhirabok A.N., Ir K. Ch. Virtual'nye datchiki v zadache funktsional'nogo diagnostirovaniya nelineynykh sistem = [Virtual sensors in the task of functional diagnostics of nonlinear systems]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*. 2022;(1):67–75. (In Russ.).
24. Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control. Marsel Dekker Inc.; 2002.
25. Fossen T.I. Guidance and control of ocean vehicles. Norway, University of Trondheim. Chichester, England: Printed by John Wiley & Sons; 1994.