

# МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

А.Ю. Коноплин, Н.А. Красавин, Д.В. Копылов

В статье предложен новый метод формирования программных сигналов управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов, обеспечивающий сохранение требуемой точности технологических манипуляционных операций, выполняемых этими аппаратами в режиме стабилизируемого зависания вблизи объектов работ. Это достигается за счет дополнительных перемещений рабочего инструмента манипулятора и изменения его ориентации на основе информации о реальных угловых и линейных смещениях аппарата относительно его исходного положения стабилизации. В то же время желаемая скорость движения инструмента по заданной траектории корректируется таким образом, чтобы манипулятор успевал скомпенсировать нежелательные смещения аппарата. Выполнено численное моделирование работы реализованного метода. При этом использовалась созданная в Matlab/Simulink модель манипулятора типа PUMA, установленного на необитаемый подводный аппарат, стабилизируемый в режиме зависания. Визуализация работы системы выполнена в среде виртуального моделирования CoppeliaSim. Результаты проведенного моделирования подтвердили работоспособность метода и показали эффективность его использования для повышения точности выполнения подводных манипуляционных операций.

**Ключевые слова:** многозвенный манипулятор, необитаемый подводный аппарат, управление скоростью, коррекция траектории, манипуляционные операции, режим стабилизируемого зависания.

## Введение

Повышение эффективности выполнения исследовательских и технологических манипуляционных операций в глубинах Мирового океана с помощью необитаемых подводных аппаратов (НПА), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ), является очень актуальной задачей. Работа таких аппаратов-роботов не требует использования специализированных обеспечивающих судов, многочисленного обслуживающего персонала, их перемещения не ограничены длиной кабель-троса, и они способны преодолевать десятки километров в поисках целевых объектов. Оснащение ММ позволяет значительно расширить функциональные возможности НПА, обеспечивая забор грунта с определенных участков, сбор морских организмов, установку маячков и различного оборудования, а также его очистку и обслуживание. Эти операции во многих случаях требуется выполнять быстро в режиме зависания НПА над или

вблизи объекта работ, так как время подводных работ часто ограничено, а их стоимость очень высока.

На сегодняшний день уже существует значительный задел в области проектирования и создания систем управления (СУ) НПА с установленными на них ММ для выполнения операций в автономном режиме [1–4]. Однако все еще не решена в полной мере задача обеспечения требуемой высокой точности выполнения технологических манипуляционных операций в режиме стабилизируемого зависания НПА вблизи объектов работ.

В первую очередь это обусловлено тем, что навигационная информация поступает от бортовых сенсоров и систем технического зрения (СТЗ) НПА с неизбежными ошибками и задержками. При этом ошибка распознавания местоположения поверхностей объектов работ, относительно которых осуществляется позиционирование аппарата, в реальных условиях составляет около 10–20 мм даже с использованием хорошо откалиброванных для водной сре-

ды СТЗ [5–7]. Причем даже с использованием дополнительного графического маркера, устанавливаемого на рабочем инструменте ММ и уточняющего положение поверхности объекта относительно этого инструмента [8], точность идентификации объекта не превышает 10 мм.

Кроме того, следящие по положению и ориентации НПА системы стабилизации в режиме зависания обеспечивают точность удержания НПА, не превышающую нескольких сантиметров, что подтверждается результатами как численного моделирования, так и экспериментальных исследований [1, 2, 9, 10]. Причиной тому является ограниченная точность СУ движителями НПА, причем эти движители за счет своих статических и динамических характеристик не способны моментально обрабатывать управляющие воздействия. Эта же причина снижает точность компенсации тягами движителей НПА силовых и моментных влияний со стороны работающего ММ, которые с высокой точностью рассчитываются алгоритмами решения обратной задачи динамики [11] с учетом экспериментально определяемых параметров взаимодействия перемещающихся звеньев и вязкой среды [12–14].

Для повышения точности и скорости работы системы манипулятор–аппарат эти динамические объекты можно оснащать более мощными исполнительными устройствами, но это неизбежно приведет к увеличению массогабаритных характеристик, уменьшению автономности (запаса хода) и повышению стоимости НПА с ММ. Однако эту задачу можно решить за счет формирования таких программных сигналов управления ММ, которые обеспечат дополнительные перемещения рабочего инструмента ММ и изменения ориентации этого инструмента на основе информации о реальных угловых и линейных смещениях НПА относительно его исходного положения стабилизации. В то же время желаемая скорость движения инструмента по заданной траектории должна автоматически изменяться таким образом, чтобы ММ успевал компенсировать нежелательные смещения аппарата.

### **1. Особенности формирования программных сигналов управления подводным ММ**

В настоящее время активно используются подходы к формированию программных сигналов управления ММ для повышения точности и скорости движения их рабочих инструментов. В частности, используемые для промышленных ММ методы [15, 16] позволяют задавать переменную максимально возможную ско-

рость движения ММ по сложным пространственным траекториям, при которой электроприводы степеней подвижности ММ работают в преднасыщенном состоянии. Метод [17] автоматически снижает скорость рабочего инструмента на наиболее криволинейных участках траекторий, где из-за изменения характера движения отдельных звеньев ММ увеличиваются динамические ошибки слежения его приводов. Однако при работе ММ в частично неопределенных условиях водной среды на подвижном (стабилизируемом) основании-аппарате управление скоростью рабочего инструмента должно осуществляться с учетом не только динамических возможностей этого манипулятора, но также и возможностей НПА-носителя точно удерживаться в заданном пространственном положении в условиях внешних возмущающих воздействий, создаваемых работающим ММ.

В работе [18] предложен метод, который позволяет снижать скорость движения ММ, когда ограниченных возможностей движительно-рулевого комплекса НПА недостаточно для компенсации воздействий ММ. Однако этот метод не даст преимуществ, если движители аппарата обеспечивают эффективное управление его перемещениями по шести степеням свободы.

В работе [19] для сохранения заданной точности движения ММ в условиях неизбежных, но незначительных смещений от исходного положения в пространстве стабилизируемого НПА, предложен метод коррекции программных траекторий рабочего инструмента многозвенного ММ. При этом на основе получаемой от бортовых гироскопов и СТЗ информации о текущих значениях угловых и линейных смещений НПА от заданного положения вводятся дополнительные перемещения рабочего инструмента ММ, компенсирующие нежелательные смещения аппарата. Однако этот метод не предполагает управления желаемой ориентацией инструмента, которая нарушается при смещении НПА, а исследования проводились на модели ММ, имеющего только три первые переносные степени подвижности. Кроме того, дополнительные перемещения ММ приводят к увеличению скорости движения его рабочего инструмента в связанной с аппаратом системе координат (СК). Это неизбежно приводит как к снижению точности работы ММ, так и к дополнительным динамическим воздействиям со стороны ММ на НПА, смещающим этот аппарат относительно объекта работ. Поэтому в данной статье предлагается новый метод формирования программных сигналов управления подводными ММ, лишенный вышеперечисленных недостатков.

Для обеспечения высокоточной стабилизации НПА должен обладать развитым движительно-руле-

вым комплексом с достаточно мощными двигателями, позволяющими управлять перемещениями аппарата по всем шести степеням свободы. При этом он должен быть оснащен высокоточной навигационной системой, позволяющей в пределах рабочей зоны ММ определять его местоположение с точностью не ниже 0,01 м [8], бортовыми гироскопами, точно измеряющими углы крена  $\gamma$ , дифферента  $\alpha$  и курса  $\beta$  НПА, а также комбинированной системой его автоматической стабилизации в пространстве [2, 10], которая за счет соответствующих тяг двигателей обеспечивает приемлемую компенсацию силовых и моментных воздействий на НПА со стороны работающего ММ.

Для подхода в любую точку рабочей зоны с требуемой ориентацией рабочего инструмента ММ должен иметь шесть степеней подвижности. Удовлетворяющие этим требованиям НПА с закрепленным на нем (в точке  $O$ )  $n$ -степенным ММ изображены на рис. 1. На этом же рисунке показаны: 1 – заданная (неизменная) в абсолютной СК  $XYZ$  желаемая пространственная траектория движения рабочего инструмента ММ, которая автоматически строится на поверхности идентифицированного объекта работ с помощью методов [8, 20]; 2 – НПА в исходном стабилизируемом положении; 3 – ММ в исходном положении; 4 – НПА в положении, смещенном относительно исходного; 5 – новое желаемое положение ММ, обеспечивающее точное прохождение его рабочего инструмента по траектории 1 с помощью метода [21]; 6 – исходное (реальное) положение ММ на смещенном НПА, из которого требуется переместить рабочий инструмент на величину вектора  $\varepsilon(t) = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$  динамической ошибки для достижения этим инструментом желаемой точки траектории.

В исходном положении 2 с центром масс НПА, который совпадает с центром его величины, совмещены начала абсолютной СК  $XYZ$  и жестко связанной с корпусом НПА СК  $X_C Y_C Z_C$ , оси которых в исходном положении НПА совпадают. Оси связанной СК совпадают с осями симметрии НПА, при этом ось  $X_C$  является его продольной осью. В текущий момент времени желаемые значения координат рабочего инструмента ММ в абсолютной СК задаются вектором  $P^*(t) \in R^3$ , вектор  $P_C(t) \in R^3$  задает желаемое положение рабочего инструмента ММ в СК  $X_C Y_C Z_C$ , в которой он работает, вектор  $\tilde{P}_C(t) \in R^3$  определяет реальное текущее положение инструмента в этой СК, а вектор  $P_C(t) \in R^3$  – смещение точки  $C$  в СК  $XYZ$ .

Элементы вектора  $P_C^*(t)$  в СК  $X_C Y_C Z_C$  можно вычислить с помощью выражения [21]

$$P_C^*(t) = R^T (P^*(t) - P_C(t)), \quad (1)$$

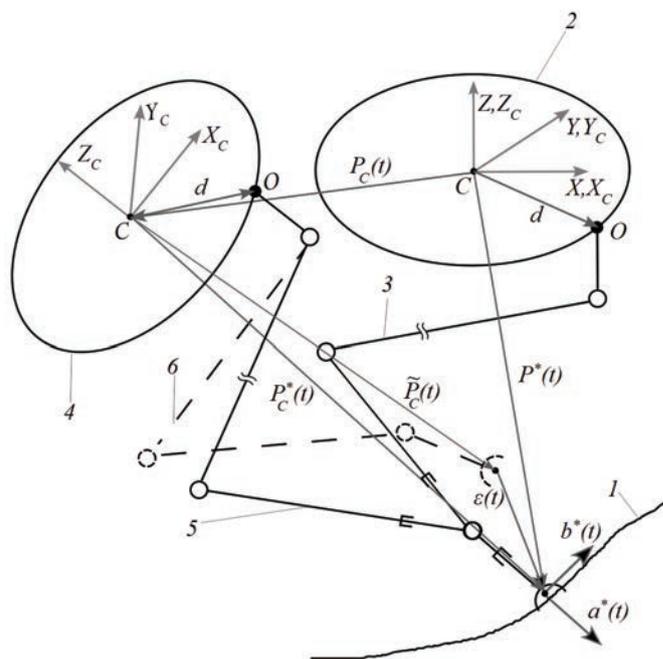


Рис. 1. НПА с ММ и схема расположения осей СК

где

$$R = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & S\alpha C\beta S\gamma - S\beta C\gamma & S\beta S\gamma + S\alpha C\beta C\gamma \\ C\alpha S\beta & C\beta C\gamma + S\alpha S\beta S\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\beta S\gamma \\ -S\alpha & C\alpha S\gamma & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}$$

– матрица поворотов СК  $X_C Y_C Z_C$  относительно СК  $XYZ$ , составленная с учетом выбранного направления осей;  $S\alpha = \sin \alpha$ ;  $S\beta = \sin \beta$ ;  $S\gamma = \sin \gamma$ ;  $C\alpha = \cos \alpha$ ;  $C\beta = \cos \beta$ ;  $C\gamma = \cos \gamma$ .

В абсолютной СК  $XYZ$  пространственная ориентация рабочего инструмента ММ задается двумя взаимно перпендикулярными единичными векторами подхода  $a(t) = [a_x, a_y, a_z]^T$  и ориентации  $b(t) = [b_x, b_y, b_z]^T$ , расположенными в одной плоскости с губками схвата этого манипулятора. Задание ориентации инструмента с помощью шести компонент векторов  $a(t)$  и  $b(t)$  избыточно, однако это существенно упрощает вычислительный процесс.

Для сохранения заданной ориентации рабочего инструмента ММ в процессе работы необходимо найти элементы векторов  $a^*(t) = [a_x^*, a_y^*, a_z^*]^T$  и  $b^*(t) = [b_x^*, b_y^*, b_z^*]^T$  (см. рис. 1) в СК  $X_C Y_C Z_C$ , зная элементы векторов  $a(t)$  и  $b(t)$  в СК  $XYZ$ . Поскольку линейные смещения НПА не будут влиять на единичные векторы  $a(t)$  и  $b(t)$ , элементы этих векторов в СК  $X_C Y_C Z_C$  можно определить с помощью выражений:

$$a^*(t) = R^T a(t), \quad b^*(t) = R^T b(t), \quad (2)$$

где

$$a^*(t) = \begin{bmatrix} a_x C \beta C \alpha + a_y S \beta C \alpha - a_z S \gamma \\ a_x (S \alpha C \beta S \gamma - S \beta C \gamma) + a_y (C \beta C \gamma + S \alpha S \beta S \gamma) + a_z C \alpha S \gamma \\ a_x (S \alpha C \beta C \gamma + S \beta S \gamma) - a_y (C \beta S \gamma - S \alpha S \beta C \gamma) + a_z C \alpha C \gamma \end{bmatrix},$$

$$b^*(t) = \begin{bmatrix} b_x C \beta C \alpha + b_y S \beta C \alpha - b_z S \gamma \\ b_x (S \alpha C \beta S \gamma - S \beta C \gamma) + b_y (C \beta C \gamma + S \alpha S \beta S \gamma) + b_z C \alpha S \gamma \\ b_x (S \alpha C \beta C \gamma + S \beta S \gamma) - b_y (C \beta S \gamma - S \alpha S \beta C \gamma) + b_z C \alpha C \gamma \end{bmatrix}.$$

Однако, как показано на рис. 1, корректирование программной траектории ММ с учетом непредсказуемых линейных и угловых смещений НПА может приводить к внезапному значительному изменению вектора  $\varepsilon(t)$  динамической ошибки слежения рабочего инструмента, связывающего реальное и желаемое положения этого инструмента в СК НПА.

Следящие СУ ММ [22] стремятся отработать дополнительные программные сигналы, в результате чего возрастают динамические ошибки слежения приводов, снижается точность отработки траектории, отдельные участки которой рабочий инструмент может «перескакивать», не успевая дотянуться. Кроме того, дополнительные движения ММ приводят к возрастанию его негативных динамических воздействий на НПА, смещающих этот аппарат относительно объекта работ.

Поэтому желаемая скорость движения инструмента по заданной траектории должна автоматически изменяться таким образом (вплоть до полной остановки), чтобы ММ успевал скомпенсировать нежелательные смещения аппарата.

В работах [17, 18] показано, что при движении рабочего инструмента ММ по пространственным траекториям снижение величины  $v^*(t)$  модуля вектора желаемой скорости этого движения позволяет уменьшить взаимовлияния в степенях подвижности многосвязника и тем самым повысить точность его работы. Следовательно, понижением величины  $v^*(t)$  можно добиться еще и повышения точности стабилизации НПА в заданном пространственном положении за счет уменьшения величин силовых и моментных воздействий ММ на этот аппарат [18]. При этом ресурс приводов ММ будет перераспределен на компенсацию смещений НПА. Кроме того, замедление движения программной точки по заданной траектории позволит рабочему инструменту оставаться на этой траектории, избегая «перескакиваний».

Желаемую траекторию движения ММ, которая изначально может задаваться набором точек и проецироваться на сканируемый объект работ [3], удобно сплайновать (или формировать изначально) с помощью сплайнов с возможностью управления скоростью [23]:

$$\begin{cases} x^*(\tau) = f_x(\tau), \\ y^*(\tau) = f_y(\tau), \\ z^*(\tau) = f_z(\tau), \end{cases} \quad (3)$$

где  $f_x(\tau), f_y(\tau), f_z(\tau)$  – аналитические зависимости, формирующие параметрические сплайны третьего порядка;  $\tau \in [0, 1]$  – па-

раметрическое время, определяющее текущее положение программной точки траектории. Продифференцируем выражение (3) по  $\tau$ , чтобы получить зависимость скорости изменения  $\tau$  от скорости  $v^*(t)$  движения рабочего инструмента ММ [23]:

$$\begin{cases} \dot{x}^* = \frac{df_x(\tau)}{d\tau} \dot{\tau} = F_x(\tau) \dot{\tau}, \\ \dot{y}^* = \frac{df_y(\tau)}{d\tau} \dot{\tau} = F_y(\tau) \dot{\tau}, \\ \dot{z}^* = \frac{df_z(\tau)}{d\tau} \dot{\tau} = F_z(\tau) \dot{\tau}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } \dot{\tau} = \frac{v^*(t)}{\sqrt{F_x^2(\tau) + F_y^2(\tau) + F_z^2(\tau)}}.$$

С использованием подхода к формированию программных сигналов управления динамическими объектами [17] можно построить дополнительный контур формирования скорости движения рабочего инструмента подводного ММ. При этом величина  $v^*(t)$  должна автоматически изменяться, гарантируя выполнение неравенства

$$\varepsilon_m(t) \leq \varepsilon_{m\max},$$

где  $\varepsilon_{m\max}$  – максимально допустимое значение евклидовой нормы вектора  $\varepsilon(t)$ , причем

$$\begin{aligned} \varepsilon_m(t) &= \|\varepsilon(t)\| = \|P_C^*(t) - \tilde{P}_C(t)\| = \\ &= \sqrt{\varepsilon_x^2(t) + \varepsilon_y^2(t) + \varepsilon_z^2(t)}. \end{aligned}$$

На рис. 2 показана структурная схема подводного ММ с высокоточной СУ [22] его электроприводами, дополнительный контур формирования скорости движения рабочего инструмента ММ, а также блок коррекции траектории и ориентации (БКТО) этого инструмента. На схеме введены следующие обозначения: БФТ – блок формирования траектории; НС – навигационная система НПА на базе СТЗ; Г – гироскопические датчики НПА; ОЗК, ПЗК – блоки решения обратной и прямой задач кинематики соответственно; Rg – регулятор величины  $v^*(t)$ ;  $Q^*(t), Q(t) \in R^3$  – соответственно, векторы желаемых и реальных обобщен-

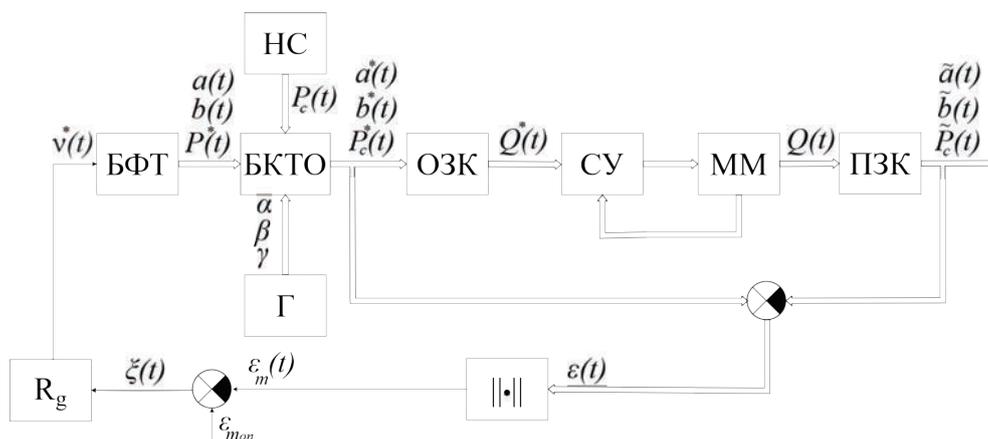


Рис. 2. Структурная схема СУ ММ

ных координат ММ;  $\tilde{a}(t), \tilde{b}(t) \in R^3$  – реальные векторы подхода и ориентации рабочего инструмента;  $\varepsilon_{mon} = \text{const}$  – опорная величина, удовлетворяющая условию  $(\varepsilon_{mon} \leq \varepsilon_{m\max})$ .

На основе величины  $\varepsilon_m(t)$  регулятор Rg формирует значение  $v^*(t)$ . На его вход поступает сигнал  $\xi(t) = \varepsilon_{mon} - \varepsilon_m$ . Принцип работы этого регулятора заключается в следующем. Если  $\xi(t) < 0$ , то справедливо неравенство  $\varepsilon_{mon} < \varepsilon_m(t)$  и Rg будет уменьшать  $v^*(t)$ . Это приведет к уменьшению составляющих вектора  $\varepsilon(t)$ , а вместе с этим произойдет уменьшение величин сил и моментов, с которыми ММ воздействует на НПА. Если  $\xi(t) > 0$ , то справедливо  $\varepsilon_{mon} > \varepsilon_m(t)$  и Rg будет увеличивать  $v^*(t)$ . Стоит отметить, что величина  $v^*(t)$  не должна быть отрицательной [17].

Для синтеза регулятора Rg необходимо описать неизменяемую часть системы, которая будет являться объектом управления для этого регулятора. Для этого можно использовать подход, применявшийся в работах [17, 24], суть которого заключается в замене нелинейных зависимостей, описывающих эту систему, линейными зависимостями с переменными коэффициентами.

В работе [24] была показана справедливость выражения

$$\varepsilon_m(t) = \tilde{k}_m (|\varepsilon_x| + |\varepsilon_y| + |\varepsilon_z|) = \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m, \quad (5)$$

где  $1/\sqrt{3} \leq \tilde{k}_m \leq 1$ .

Вектор  $\varepsilon(t)$  динамической ошибки рабочего инструмента ММ может быть записан как:

$$\varepsilon(t) = F_D(Q^*) - F_D(Q), \quad (6)$$

где  $F_D(Q(t)) \in R^3$  – функция, описывающая решение прямой задачи кинематики ММ.

Полагая, что в приводах ММ используются высокоточные СУ [22], выражение (6) можно записать в виде:

$$\varepsilon(t) = F_{FD} \varepsilon_q(t),$$

где  $\varepsilon_q(t) \in R^n$  – вектор динамических ошибок каждого привода  $n$ -степенного ММ,  $F_{FD} \in R^{3 \times n}$ . Тогда элемент  $\tilde{\varepsilon}_m$  можно представить в виде:

$$\tilde{\varepsilon}_m = \sum_{i=1}^3 \left| \sum_{j=1}^n k_{FDij} \varepsilon_j \right|,$$

где  $k_{FDij}$  – текущие значения элементов матрицы  $\tilde{F}_{FD}$ . Далее вместо  $\tilde{\varepsilon}_m$  будем использовать оценку  $\tilde{\tilde{\varepsilon}}_m$  ее максимальной величины:

$$\tilde{\tilde{\varepsilon}}_m \leq 3\tilde{k}_{FD} \sum_{j=1}^n |\varepsilon_j| = \tilde{\tilde{\varepsilon}}_m,$$

где  $\tilde{k}_{FD}$  – величина максимально возможного по модулю значения элементов матрицы  $\tilde{F}_{FD}$ , т.е.  $\tilde{k}_{FD} = \max |k_{FDij}|, i = 1, 3, j = 1, n$ . Использование величины  $\tilde{\tilde{\varepsilon}}_m$  позволяет существенно упростить описание неизменяемой части системы.

Использование адаптивных СУ приводами подводного ММ [22] позволяет динамику каждого привода, замкнутого единичной отрицательной обратной связью, описать передаточной функцией по ошибке с постоянными коэффициентами:

$$\varepsilon_i(s) = \Phi_{ei}(s) q_i^*(s).$$

Тогда (5) можно переписать в виде:

$$\varepsilon_m(s) = 3\tilde{k}_{FD} \tilde{k}_m \sum_{i=1}^n \Phi_{ei}(s) q_i^*(s) \text{sign}(\varepsilon_i). \quad (7)$$

Полагаем, что во всех степенях подвижности ММ установлены приводы, описываемые передаточными функциями  $\Phi_{em}(s)$  с одинаковыми параметрами, соответствующими их работе в самых неблагоприятных условиях.

ятных условиях. В результате выражение (7) будет иметь вид:

$$\varepsilon_m(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\Phi_{\varepsilon_m}(s)\sum_{i=1}^n q_i^*(s)\text{sign}(\varepsilon_i).$$

Вектор обобщенных координат ММ, записанный в области изображений, с учетом выражения (4) может быть представлен в виде [18]:

$$Q^*(s) = \frac{\partial F_I}{\partial X^*} \dot{X}^* / s = \left[ \frac{\frac{\partial F_I}{\partial X^*} \mathbb{F}(\tau)}{\sqrt{F_x^2(\tau) + F_y^2(\tau) + F_z^2(\tau)}} \right] v^*(s) / s = k_v v^*(s) / s, \quad (8)$$

где  $F_I(X^*(t)) \in R^n$  – функция, описывающая решение обратной задачи кинематики;  $k_v = (k_{v1}, k_{v2}, \dots, k_{vn})^T$  – вектор текущих значений соответствующих функций;  $\mathbb{F}(\tau) = (F_x(\tau), F_y(\tau), F_z(\tau))^T$ .

В таком случае  $\varepsilon_m(s)$  будет иметь вид:

$$\varepsilon_m(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\Phi_{\varepsilon_m}(s)\frac{v^*(s)}{s}\sum_{i=1}^n |k_{vi}|.$$

С учетом описанного передаточная функция неизменяемой части системы примет вид:

$$W(s) = \frac{\varepsilon_m(s)}{v^*(s)} = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\frac{\Phi_{\varepsilon_m}(s)}{s}\sum_{i=1}^n |k_{vi}|. \quad (9)$$

Значения коэффициентов  $\tilde{k}_{FD}, k_{vi}, \tilde{k}_m$  заранее не определены и должны выбираться таким образом, чтобы синтезированный регулятор Rg обеспечивал одинаковое качество работы системы при всех возможных значениях этих коэффициентов.

Зная параметры модели объекта управления, которая описывается выражением (9), можно синтезировать регулятор Rg, который будет обеспечивать системе заданное качество управления и устойчивость при замыкании ее единичной отрицательной обратной связью.

## 2. Описание параметров модели объекта управления для регулятора скорости

Рассмотрим подводный робототехнический комплекс, состоящий из НПА, находящегося в режиме зависания над объектом работ, и ММ типа PUMA, который закреплен под аппаратом и смещен вдоль его продольной оси таким образом, чтобы обеспечивать возможность работы не только в нижней полусфере, но и перед аппаратом. Описание математических моделей многозвенника и аппарата было подробно

приведено в работах [2, 3, 18]. Используемые НПА и ММ схематично изображены на рис. 1. Краткий список основных параметров аппарата и манипулятора приведен в табл.

Параметры НПА и ММ

Параметры		Величины
НПА	Д×Ш×В, м <sup>3</sup>	1,2×1,5×0,9
	Масса, кг	170
	d, м	[0,5; 0; 0,5]
Звено 1	Длина, м	0,05
	Масса, кг	0,4
Звено 2	Длина, м	0,5
	Масса, кг	4
Звено 3	Длина, м	0,5
	Масса, кг	4
Звено 4	Длина, м	0,15
	Масса, кг	0,5

НПА имеет 3 пары движителей, обеспечивающих его стабилизацию по всем 6 степеням подвижности. Конфигурация движительно-рулевого комплекса НПА подробно рассмотрена в работе [3]. Комбинированная система стабилизации рассматриваемого НПА компенсирует динамические воздействия со стороны движущегося ММ, рассчитываемые с помощью известных методов [18], а также компенсирует линейные и угловые смещения НПА на основе данных, поступающих от бортовых гироскопов и систем визуальной навигации [3]. При этом данные о линейных смещениях НПА поступают с задержкой в 0,2 с, что обусловлено особенностями работы визуальной навигационной системы на базе СТЗ.

При синтезе регулятора Rg будем рассматривать только первые три переносные степени подвижности ММ (см. рис. 2), считая, что в них установлены одинаковые приводы с двигателями постоянного тока независимого возбуждения. Передаточные функции, описывающие динамику приводов, имеют вид:

$$W_n(s) = \frac{q_i(s)}{q_i^*(s)} = \frac{k_n}{(T_i s + 1)s}. \quad (10)$$

Высокоточные СУ приводами ММ [18] за счет использования адаптивных корректирующих устройств позволяют стабилизировать параметры электроприводов подводного ММ на номинальном уровне. Поэтому передаточная функция (10) имела следующие постоянные параметры:

$$W_n(s) = \frac{70}{(0,006s + 1)s}.$$

Тогда передаточную функцию по ошибке трех приводов, замкнутых единичной обратной связью, можно представить в виде:

$$\Phi_{em}(s) = \frac{1}{1+W_n(s)} = 0,0143 \frac{(0,006s+1)s}{(0,0142s+1)(0,00008s+1)}. \quad (11)$$

С учетом (8) элементы вектора  $k_v$  будут рассчитываться по формуле:

$$k_v = \frac{Q^*(s)s}{v^*(s)}.$$

Чтобы вычислить значения элементов вектора  $k_v$  зададим траекторию движения рабочего инструмента ММ в пространстве. Эта траектория описывается функцией  $y = -0,28\sin(25x) + 0,5$ , заданной в плоскости XY абсолютной СК (см. рис. 3).

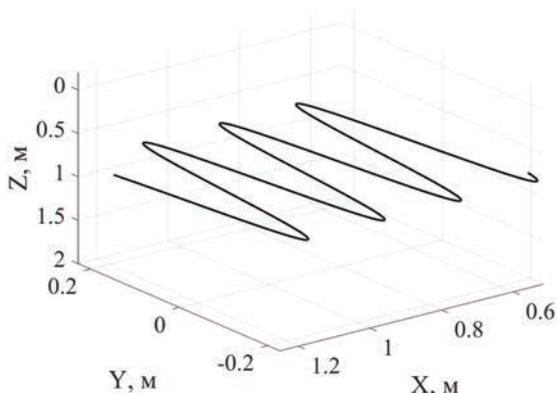


Рис. 3. Траектория движения ММ в абсолютной СК

В результате максимальные по модулю значения элементов вектора  $k_v$ :  $|k_{v1}| = 3,4$ ;  $|k_{v2}| = 2,1$ ;  $|k_{v3}| = 3,1$ . Тогда с учетом вышеописанного соответствующие коэффициенты будут иметь следующие значения:

$$\tilde{k}_{FD} = 1; \sum_{i=1}^n |\tilde{k}_{vi}| = 8,6; \tilde{k}_m = 1.$$

Выбранное значение величины  $\varepsilon_{мон} = 0,0095$ , которая является опорной для регулятора Rg (см. рис. 2), сопоставимо с желаемой точностью позиционирования рабочего инструмента ММ в связанной с ним СК.

С учетом выражения (11), а также полученных значений коэффициентов передаточная функция неизменяемой части системы (9) примет вид:

$$W(s) = \frac{0,37(0,006s+1)}{(0,0142s+1)(0,00008s+1)}. \quad (12)$$

Для придания системе заданных показателей качества был синтезирован ПИД-регулятор Rg с коэф-

фициентами  $k_p=15$ ,  $k_i=0,001$ ,  $k_d=10$ . Исследование логарифмических амплитудно- и фазово-частотной характеристик передаточной функции (12) с ПИД-регулятором подтвердило устойчивость полученной системы при замыкании ее единичной отрицательной обратной связью.

### 3. Исследование качества работы синтезированной системы

Для исследования качества работы синтезированной СУ с помощью численного моделирования в Matlab/Simulink была использована описанная выше модель НПА, оснащенного подводным ММ. Визуализация процесса моделирования проводилась в среде CoppeliaSim (рис. 4).

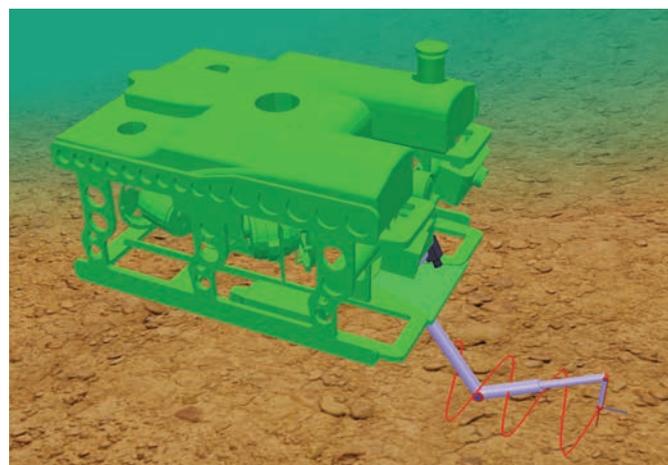


Рис. 4. Сцена в симуляторе CoppeliaSim

В процессе моделирования НПА находился в режиме стабилизируемого зависания в толще воды. ММ двигался по пространственной траектории (см. рис. 3). Было принято, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) оси абсолютной и связанной с НПА СК совпадали.

В первом случае инструмент ММ двигался с постоянной скоростью  $v^*=0,19$  м/с с заданной ориентацией, описываемой векторами  $a(t)=[0,0,1]^T$  и  $b(t)=[-1,0,0]^T$ . При этом не осуществлялась корректировка программной траектории (1) и ориентации инструмента (2).

На рис. 5 представлены евклидовы нормы  $\|\tilde{r}\|$  и  $\|\tilde{e}\|$  векторов смещения НПА от точки стабилизации и отклонения рабочего инструмента ММ от предписанной траектории соответственно, измеряемые в СК XYZ. Из представленных графиков видно, что в процессе движения рабочего инструмента ММ системе стабилизации не удалось эффективно скомпенси-

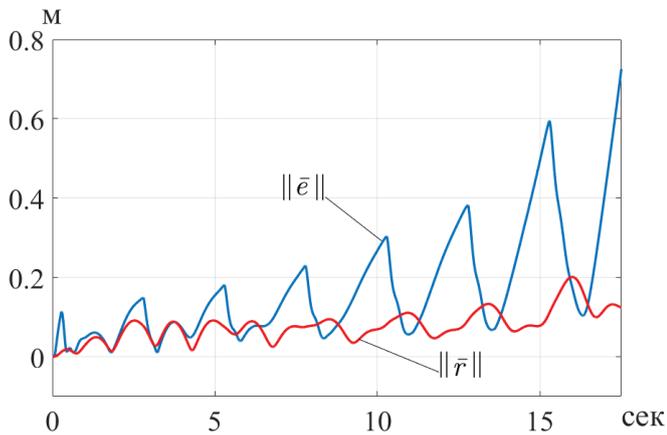


Рис. 5. Отклонения рабочего инструмента ММ (синий) и смещения НПА (красный) при движении с постоянной скоростью без коррекции траекторий и ориентации рабочего инструмента

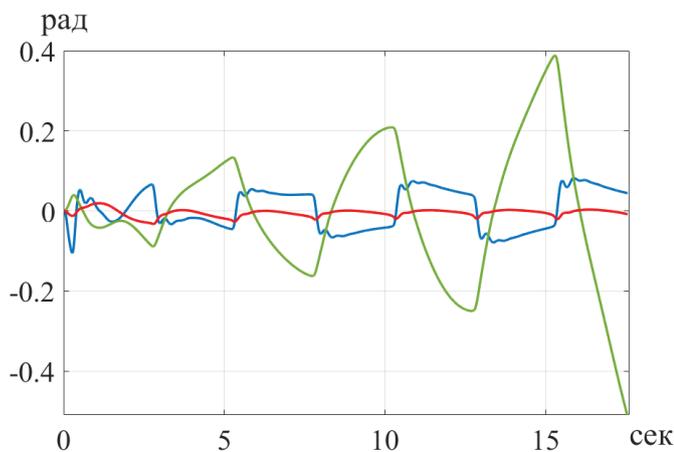


Рис. 6. Углы крена (синий), курса (зеленый), дифферента (красный) НПА при движении с постоянной скоростью без коррекции траекторий и ориентации рабочего инструмента

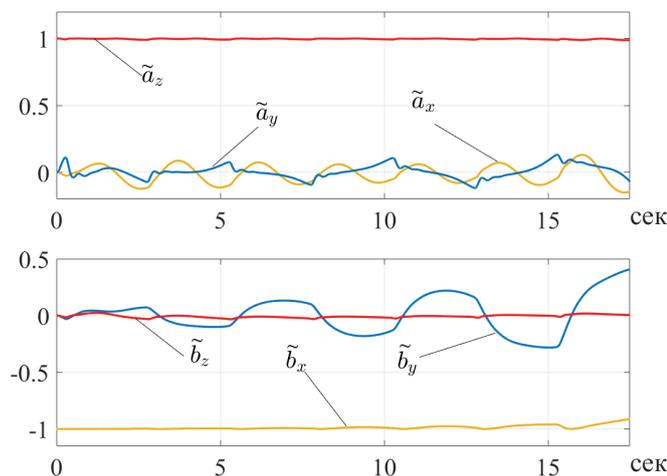


Рис. 7. Составляющие векторов  $\tilde{a}(t)$  (сверху) и  $\tilde{b}(t)$  (снизу) ориентации рабочего инструмента ММ в абсолютной СК при движении с постоянной скоростью без коррекции траекторий и ориентации рабочего инструмента

ровать линейные (см. рис. 5) и угловые (см. рис. 6) смещения НПА ввиду динамических воздействий ММ, оказываемых на точку его крепления к НПА, а также задержек в получении навигационной информации о линейных смещениях НПА, статических и динамических характеристиках движителей НПА, влияющих на быстродействие системы стабилизации.

В ходе моделирования смещение НПА достигало 0,2 м (см. рис. 5), а его угловые отклонения – 0,4 рад (см. рис. 6). В результате с учетом линейных и угловых смещений НПА отклонения рабочего инструмента ММ превышали 0,5 м (см. рис. 5), при этом из графиков на рис. 7 также видно, что в процессе движения ММ не мог сохранять заданную ориентацию рабочего инструмента.

Во втором случае ММ двигался по той же траектории с той же постоянной скоростью, однако при этом программная траектория и ориентация рабочего инструмента корректировались с учетом текущих линейных и угловых отклонений НПА от точки стабилизации. На рис. 8 показаны евклидовы нормы отклонения НПА от точки стабилизации  $\|\tilde{r}\|$  и рабочего инструмента ММ от предписанной траектории  $\|\tilde{e}\|$ .

Из представленных графиков видно, что при отклонениях НПА, достигающих 0,15 м, благодаря коррекции программных траекторий и ориентации рабочего инструмента отклонения рабочего инструмента от траектории не превышали 0,05 м. При этом по мере отдаления инструмента от основания ММ и приближения к границам рабочей зоны манипулятора величина отклонения возрастает (см. рис. 8,  $\|\tilde{e}\|$ ), что обусловлено возрастающими моментными воздействиями на ММ на точку его крепления к НПА.

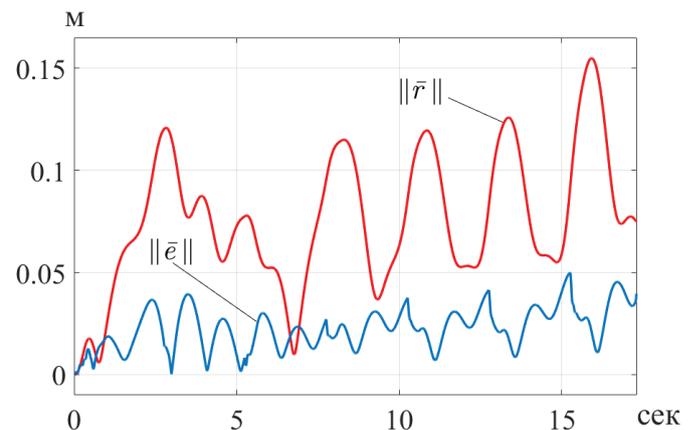


Рис. 8. Отклонения рабочего инструмента (синий) и смещения НПА (красный) при движении с постоянной скоростью с коррекцией траекторий и ориентации рабочего инструмента

На рис. 9 показаны отклонения НПА и рабочего инструмента ММ при движении этого инструмента с

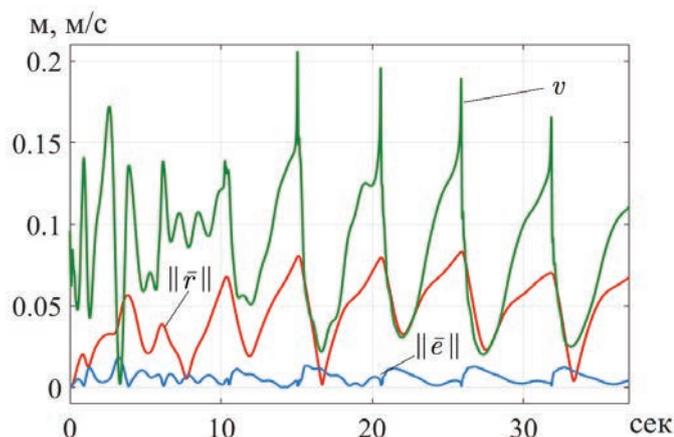


Рис. 9. Отклонения рабочего инструмента (синий), смещения НПА (красный), скорость движения рабочего инструмента (зеленый) при движении с переменной скоростью с коррекцией траекторий и ориентации рабочего инструмента

переменной скоростью  $v^*$  с использованием разработанной системы формирования программных сигналов управления.

Без использования разработанной СУ величина  $\|\bar{e}\|$  достигала 0,05 м (см. рис. 8). С использованием разработанной СУ скоростью движения ММ на протяжении всей траектории величина  $\|\bar{e}\|$  не превышала 0,015 м (см. рис. 9). Использование этой СУ позволило сократить величину отклонения рабочего инструмента более чем на 70% на большинстве участков траектории. При этом из графиков на рис. 9 видно, что в отличие от предыдущего рассмотренного случая (рис. 8) величина отклонения рабочего инструмента от траектории не увеличивалась по мере его отдаления от точки крепления ММ. Это связано с тем, что по мере вытягивания многозвенника происходило автоматическое снижение скорости движения  $v^*(t)$ , в результате этого ММ не оказывал на точку сво-

его крепления значительных динамических воздействий. Это видно из графика линейного отклонения НПА  $\|\bar{r}\|$  – в процессе моделирования его отклонения не превышали 0,08 м.

Стоит также отметить, что в последних двух случаях численного моделирования рабочий инструмент ММ в ходе своего движения по предписанной траектории (см. рис. 3) сохранял заданную пространственную ориентацию.

## Заключение

Предложенный метод формирования программных сигналов управления обеспечивает корректирование конфигурации ММ, компенсирующее влияние ошибок системы стабилизации НПА на положение и ориентацию рабочего инструмента этого манипулятора. В то же время скорость движения инструмента по предписанной траектории автоматически снижается в моменты времени, когда электроприводы ММ обрабатывают дополнительные сигналы управления с неизбежными динамическими ошибками. При этом указанная скорость автоматически увеличивается на тех участках траекторий, при движении по которым СУ приводами ММ и система стабилизации НПА способны обеспечивать желаемую точность движения рабочего инструмента. Результаты проведенного моделирования подтвердили работоспособность реализованного метода и показали эффективность его использования для повышения точности выполнения подводных манипуляционных операций.

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

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Konoplin A., Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1126.
3. 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 (Switzerland). 2022. Vol. 12, No. 3.
4. 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.
5. Eustice R. M., Singh H., Leonard J. J. and Walter M. R. Visually mapping the RMS Titanic: Conservative covariance estimates for SLAM information filters // Int. J. Robot. Res. 2006. Vol. 25, No. 12. P. 1223–1242.
6. Yurmanov A., Vasilenko R. and Panchuk M. Algorithm of underwater objects identification considering defects // 2024 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Russian Federation. 2024. P. 081–084.
7. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system // Ocean Engineering. 2021. No. 224(80). P. 108744.
8. Yurmanov A., Panchuk M., Konoplin A. Method for clarifying trajectories of multi-link manipulators mounted on underwater vehicles // IEEE International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. 2023. P. 364–368.
9. Половко С.А., Серов Д.К., Горюнов В.В., Бондаренко И.А., Варганов В.Л. Опыт проведения экспериментальных исследований для проверки эффективности системы управления движением необитаемого подводного аппарата в режиме позиционирования // Сборник тезисов 35-й Междунар. науч.-техн. конф. «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА». 2024. С. 199–200.

10. McLain T.W., Rock S.M. Experiments in the hydrodynamic modeling of an underwater manipulator // Proceedings of Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. 1996. P. 463–469.
11. 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.
12. Sarpkaya T., Garrison C.J. Vortex formation and resistance in unsteady flow // Journal of Applied Mechanics. 1963. No. 30(1). P. 16–24.
13. Filaretov V.F., Konoplin A.Ju., Getman A.V. Experimental determination of the viscous friction coefficients for calculation of the force impacts on the moving links of the underwater manipulators // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2015. Vol. 16, No. 11. P. 738–743.
14. Kolodziejczyk W. The method of determination of transient hydrodynamic coefficients for a single DOF underwater manipulator // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 122–131.
15. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Метод формирования программной скорости движения рабочего инструмента многозвенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. № 21(12). С. 696–705.
16. Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программной скорости движения рабочего инструмента многозвенного манипулятора // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: Материалы IX Междунар. науч.-техн. интернет-конференции молодых ученых, Омск, 14 мая 2019 года. Омск: Омский гос. техн. ун-т. 2019, С. 73–77.
17. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47–54.
18. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А. Система управления скоростью движения манипуляторов, установленных на необитаемых подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 2(40). С. 29–38.
19. Юрманов А.П., Панчук М.О., Коноплин А.Ю. Метод коррекции траекторий рабочего органа многозвенного манипулятора необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 4(46). С. 43–51.
20. Коноплин А.Ю., Юрманов А.П., Красавин Н.А., Пятавин П.А. Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3(37). С. 4–15.
21. 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.
22. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Зуев А. В., Красавин Н. А. Метод синтеза систем высокоточного управления перемещениями подводных манипуляторов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4. С. 31–37.
23. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed // 2016 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA). Tangerang, Indonesia, 2016. P. 93–96.
24. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Изв. Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 99–107.

## Сведения об авторах

**КОНОПЛИН Александр Юрьевич**, к.т.н, ведущий научный сотрудник

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

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

**Научные интересы:** автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел. (раб.): 89244298396. **E-mail:** konoplin@marine.febbras.ru

**ORCID:** 0000-0001-7554-1002

**КРАСАВИН Никита Андреевич**, научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика 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. (раб.): 89025063014. **E-mail:** nakrasavin@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0003-1102-5409

**КОПЫЛОВ Денис Владимирович**, младший научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;

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

**Научные интересы:** автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, математические модели динамических систем

Тел. (раб.): 89996147161. **E-mail:** kopylov.dvl@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0008-5725-8260

## Для цитирования:

Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Копылов Д.В. МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 1 (51). С. 63–74. DOI: 10.37102/1992-4429\_2025\_51\_01\_06. EDN: IQNKJV.



# METHOD OF FORMATION OF PROGRAM CONTROL SIGNALS FOR MULTILINK MANIPULATORS OF UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES

**A.Yu. Konoplin, N.A. Krasavin, D.V. Kopylov**

The paper proposes a new method of formation of program control signals for multilink manipulators of unmanned underwater vehicles, which ensures preservation of the required accuracy of technological manipulation operations performed by these vehicles in the mode of stabilized hovering near the objects of work. This is achieved by additional movements of the manipulator working tool and changing its orientation on the basis of information about real angular and linear displacements of the vehicle relative to its initial stabilization position. At the same time, the desired speed of the tool movement along a given trajectory is corrected in such a way that the manipulator has time to compensate undesirable displacements of the vehicle. Numerical modeling of the implemented method was performed. The model of the PUMA-type manipulator created in Matlab/Simulink, installed on an unmanned underwater vehicle stabilized in the hovering mode, was used. Visualization of the system operation was performed in the virtual simulation environment CoppeliaSim. The results of the simulation confirmed the performance of the method and showed the effectiveness of its use to improve the accuracy of underwater manipulation operations.

**Keywords:** multilink manipulator, uninhabited underwater vehicle, speed control, trajectory correction, manipulation operations, stabilized hovering mode.

## References

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Konoplin A., Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1126.
3. 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 (Switzerland). 2022. Vol. 12, No. 3.
4. 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.
5. Eustice R. M., Singh H., Leonard J. J. and Walter M. R. Visually mapping the RMS Titanic: Conservative covariance estimates for SLAM information filters // Int. J. Robot. Res. 2006. Vol. 25, No. 12. P. 1223–1242.
6. Yurmanov A., Vasilenko R. and Panchuk M. Algorithm of underwater objects identification considering defects // 2024 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Russian Federation. 2024. P. 081–084.
7. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system // Ocean Engineering. 2021. No. 224(80). P. 108744.
8. Yurmanov A., Panchuk M., Konoplin A. Method for clarifying trajectories of multi-link manipulators mounted on underwater vehicles // IEEE International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. 2023. P. 364–368.
9. Polovko S.A., Serov D.K., Gorjunov V.V., Bondarenko I.A., Vartanov V.L. Opyt provedeniya jeksperimental'nyh issledovaniy dlja proverki jeffektivnosti sistemy upravlenija dvizheniem neobitaemogo podvodnogo apparata v rezhime pozicionirovanija // Sbornik tezisov 35-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «JeKSTREMAL"NAJA ROBOTOTEHNIKA». 2024. P. 199–200. [In Russ.]
10. McLain T.W., Rock S.M. Experiments in the hydrodynamic modeling of an underwater manipulator // Proceedings of Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. 1996. P. 463–469.
11. Filaretov V.F., Konoplin A.Ju. Sistema avtomaticheskoy stabilizacii podvodnogo apparata v rezhime zavisaniya pri rabotajushhem mnogozvennom manipuljatore. Chast' 1 // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2014. No. 6. P. 53–56. [In Russ.]
12. Sarpkaya T., Garrison C.J. Vortex formation and resistance in unsteady flow // Journal of Applied Mechanics. 1963. No. 30(1). P. 16–24.
13. Filaretov V.F., Konoplin A.Ju., Getman A.V. Experimental determination of the viscous friction coefficients for calculation of the force impacts on the moving links of the underwater manipulators // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2015. Vol. 16, No. 11. P. 738–743.
14. Kolodziejczyk W. The method of determination of transient hydrodynamic coefficients for a single DOF underwater manipulator // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 122–131.
15. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. Metod formirovanija programnoj skorosti dvizhenija rabocheho instrumenta mnogostepennogo manipuljatora // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2020. No. 21(12). P. 696–705. [In Russ.]
16. Gubankov A.S., Gornostaev I.V. Razrabotka metoda formirovanija programnoj skorosti dvizhenija rabocheho instrumenta mnogoste-

pennogo manipulatora // Avtomatizacija, mehatronika, informacionnye tehnologii: Materialy IX Mezhdunar. nauch.-tehn. internet-konferencii molodyh uchenyh, Omsk, 14 maja 2019 goda. Omsk: Omskij gos. tehn. un-t. 2019, P. 73–77. [In Russ.]

17. Filaretov V.F., Juhimec D.A., Konoplin A.Ju. Metod sinteza sistemy avtomaticheskogo upravlenija rezhimom dvizhenija shvata manipulatora po slozhnym prostranstvennym traektorijam // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2012. No. 6. P. 47–54. [In Russ.]

18. Konoplin A.Ju., Krasavin N.A. Sistema upravlenija skorost'ju dvizhenija manipulatorov, ustanovlennyh na neobitaemyh podvodnyh apparatah // Podvodnye issledovanija i robototekhnika. 2022. No 2(40). P. 29–38. [In Russ.]

19. Jurmanov A.P., Panchuk M.O., Konoplin A.Ju. Metod korrekcii traektorij rabocheho organa mnogozvennogo manipulatora neobitaemogo podvodnogo apparata // Podvodnye issledovanija i robototekhnika. 2023. No. 4(46). P. 43–51. [In Russ.]

20. Konoplin A.Ju., Jurmanov A.P., Krasavin N.A., Pjativin P.A. Razrabotka, programmaja realizacija i issledovanie sistemy upravlenija mnogozvennymi manipulatorami neobitaemyh podvodnyh apparatov pri dinamicheskom pozicionirovanii nad morskimi ob#ektami // Podvodnye issledovanija i robototekhnika. 2021. No. 3(37). P. 4–15. [In Russ.]

21. 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.

22. Filaretov V.F., Konoplin A.Ju., Zuev A.V., Krasavin N.A. Metod sinteza sistem vysokotochnogo upravlenija peremeshhenijami podvodnyh manipulatorov // Podvodnye issledovanija i robototekhnika. 2020. No. 4. P. 31–37. [In Russ.]

23. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed // 2016 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA). Tangerang, Indonesia, 2016. P. 93–96.

24. Filaretov V.F., Juhimec D.A. Sintez sistemy avtomaticheskogo formirovanija programmyh signalov upravlenija dvizheniem podvodnogo apparata po slozhnym prostranstvennym traektorijam // Izv. Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija. 2010. No. 1. P. 99–107. [In Russ.]

### Recommended citation:

Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Kopylov D.V. METHOD OF FORMATION OF PROGRAM CONTROL SIGNALS FOR MULTILINK MANIPULATORS OF UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 1 (51). P. 63–74. DOI: 10.37102/1992-4429\_2025\_51\_01\_06. EDN: IQHKJV.

## About the authors

**KONOPLIN Aleksandr Yurievich**, 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:** konoplin@marine.febras.ru

**ORCID:** 0000-0001-7554-1002

**KRASAVIN Nikita Andreevich**, 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, information and control systems

**Phone:** 89025063014

**E-mail:** nakrasavin@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0003-1102-5409

**KOPYLOV Denis Vladimirovich**, junior 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

**Phone:** 89996147161

**E-mail:** kopylov.dvl@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0008-5725-8260

