

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ

А.Ю. Коноплин, Н.А. Красавин

Для многозвенного манипулятора, установленного на борту необитаемого подводного аппарата (НПА), решается задача синтеза системы управления скоростью движения схвата при осуществлении сложных пространственных траекторий. Система позволяет сохранять заданную точность выполнения операций в условиях динамического позиционирования НПА вблизи объекта работ. Вводится дополнительный контур формирования скорости движения схвата манипулятора, позволяющий учитывать динамические возможности его электроприводов. При этом учитывается возможность НПА точно удерживать заданное положение в условиях внешних возмущений, создаваемых работающим манипулятором. В результате скорость движения схвата автоматически снижается, когда аппарат из-за конструктивных особенностей не может эффективно стабилизировать свое положение по некоторым степеням подвижности. Выполнено численное моделирование работы системы управления, синтезированной на основе предложенного метода. При этом использовалась созданная в Matlab/Simulink модель манипулятора типа PUMA, установленного на НПА, стабилизируемый в режиме зависания. Визуализация работы системы выполнена в среде виртуального моделирования CoppeliaSim. Результаты моделирования подтвердили работоспособность разработанной системы управления и показали эффективность ее использования для повышения точности выполнения подводных манипуляционных операций.

**Ключевые слова:** многозвенный манипулятор, необитаемый подводный аппарат, динамическое позиционирование, точность управления, подводные операции..

## Введение

Одной из актуальных проблем, затрудняющих выполнение подводных манипуляционных операций с помощью НПА в режиме стабилизируемого зависания в толще воды, являются негативные динамические воздействия со стороны работающих многозвенных манипуляторов (ММ) [1–7]. Указанные воздействия смещают НПА относительно целевых объектов, снижая тем самым точность или делая невозможным выполнение требуемых операций.

В настоящее время существуют подходы [3–5], позволяющие компенсировать силовые и моментные воздействия тягами движителей НПА. Для обеспечения высокоточной стабилизации НПА должен обладать развитым движительно-рулевым комплексом с мощными движителями, позволяющими управлять перемещениями аппарата по всем шести степеням свободы. Однако многие автономные и гибридные

НПА имеют обтекаемую форму корпуса, вытянутую вдоль продольной оси аппарата, что затрудняет стабилизацию таких аппаратов, например, по углу крена и линейному смещению вдоль поперечной оси НПА. Более того, у некоторых НПА стабилизация по углу крена осуществляется только за счет регулирования метацентрической высоты. Очевидно, что системы стабилизации таких аппаратов не смогут с одинаковой точностью компенсировать составляющие векторов силовых и моментных воздействий ММ, направленные вдоль различных осей связанной с НПА системы координат (СК).

Для решения указанной проблемы в работе [6] предложено с использованием градиентного метода формировать режимы движения НПА и ММ таким образом, чтобы минимизировать величины динамических воздействий манипулятора на аппарат. Это позволило значительно уменьшить величины тяг движителей НПА, необходимых для компенса-

ции влияний со стороны ММ. Однако в процессе минимизации функционалов градиентным методом возможно появление точек локального минимума, снижающих качество работы системы. Кроме того, поскольку НПА является инерционным динамическим объектом, то использование его перемещений для позиционирования схвата ММ негативно сказывается на точности выполнения операции.

В работе [7] предложен подход, позволяющий изменять конфигурацию трехзвенного избыточного ММ, работающего с захваченным грузом в вертикальной плоскости. Измененная конфигурация ММ позволяет приблизить центр масс груза к вертикальной оси НПА-носителя и уменьшить силовые и моментные воздействия ММ на аппарат. Но этот подход не может быть использован для отработки сложных пространственных траекторий манипуляторами, не имеющими избыточных степеней подвижности.

Синтезированная в работе [8] система управления (СУ) позволяет задавать переменную максимально возможную скорость движения схвата ММ по сложным пространственным траекториям. Причем заданная точность этого движения достигается за счет автоматического снижения скорости схвата на участках траектории с наибольшей кривизной, где из-за изменения характера движения отдельных звеньев ММ возрастают динамические ошибки слежения приводов. Этот принцип может быть использован и для подводного ММ, НПА-носитель которого жестко зафиксирован вблизи объекта манипуляционных работ. Если же НПА находится в режиме динамической стабилизации в толще воды, то при формировании скорости движения схвата ММ необходимо учитывать не только динамические возможности этого манипулятора, но также и возможности аппарата-носителя точно удерживаться в заданном положении в условиях внешних возмущающих воздействий, создаваемых работающим ММ.

С учетом вышеизложенного в статье ставится задача разработать метод синтеза системы автоматического формирования такой переменной скорости движения схвата ММ по сложным пространственным траекториям, при которой будет сохраняться заданная точность выполнения операции в условиях динамического позиционирования НПА-носителя вблизи объекта работ.

## 1. Описание системы формирования скорости движения схвата подводного ММ

В работе [8] показано, что при движении схвата ММ по криволинейным траекториям снижение вели-

чины  $v^*(t)$  модуля вектора желаемой скорости этого движения позволяет уменьшить взаимовлияния в степенях подвижности многозвенника и тем самым повысить точность его работы. При этом силы вязкого трения, действующие на движущиеся звенья ММ и приводящие к нежелательным динамическим воздействиям манипулятора на НПА, имеют линейную и (или) квадратичную зависимость от скорости движения звеньев [2–4, 9]. Следовательно, понижением величины  $v^*(t)$  можно добиться еще и требуемой точности стабилизации НПА в заданном пространственном положении за счет уменьшения величин силовых и моментных воздействий ММ на этот аппарат.

Поэтому с использованием подхода к формированию программных сигналов управления динамическими объектами [8] можно построить дополнительный контур формирования скорости движения схвата подводного ММ. Причем величина  $v^*(t)$  должна автоматически изменяться в зависимости от величин элементов вектора  $\varepsilon_a(t) = (\varepsilon_{ax}, \varepsilon_{ay}, \varepsilon_{az})^T$  динамической ошибки схвата ММ. Это обусловлено тем, что все порождаемые движениями звеньев подводного ММ силы вязкого трения, действующие на эти звенья, а также взаимовлияния в степенях подвижности неизбежно приведут к возникновению внешних моментов на выходных валах электроприводов соответствующих степеней подвижности ММ. Указанные внешние моменты даже при наличии высокоточных СУ [9] будут увеличивать ошибки слежения приводов ММ, а следовательно, и величину  $\varepsilon_a$ . Причем соотношение величин элементов этого вектора характеризует, хоть и косвенно, направление действующих на НПА векторов негативных сил и моментов со стороны ММ. Это позволит снижать скорость движения схвата ММ, когда аппарат из-за конструктивных особенностей не может эффективно стабилизировать свое положение по некоторым степеням подвижности.

На рис. 1 пунктиром обведена структурная схема подводного ММ с высокоточной СУ [9] его электроприводами, а также изображен дополнительный контур формирования скорости движения схвата этого ММ. На схеме введены следующие обозначения: БФТ – блок формирования траектории; ОЗК, ПЗК – блоки решения обратной и прямой задач кинематики соответственно;  $R$  – регулятор величины  $v^*(t)$ ;  $Q^*(t), Q(t) \in R^3$  – соответственно векторы желаемых и реальных обобщенных координат ММ;  $X^*(t), X(t) \in R^3$  – соответственно векторы желаемого и реального положений схвата ММ в связанной с основанием манипулятора СК  $X_0 Y_0 Z_0$ ;  $E(t)$  – вели-

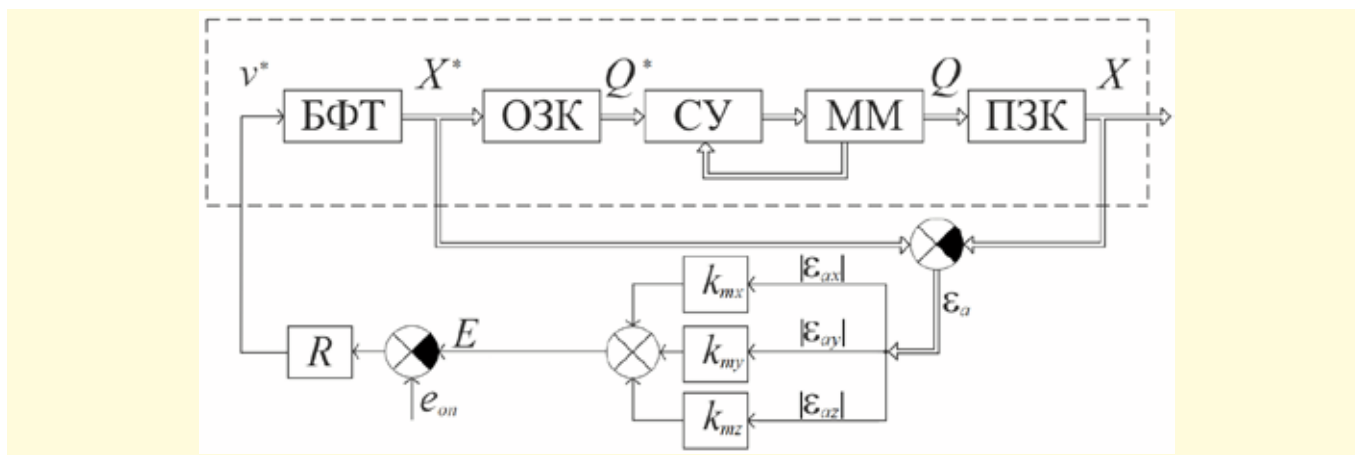


Рис. 1. Структурная схема СУ ММ

чина, характеризующая оценку точности движения ММ;  $e_{on}$  – опорная величина [8].

БФТ описывается системой уравнений [10]:

$$\begin{cases} \dot{x}^*(\tau) = f_x(\tau), \\ \dot{y}^*(\tau) = f_y(\tau), \\ \dot{z}^*(\tau) = f_z(\tau), \end{cases} \quad (1)$$

где  $f_x(\tau), f_y(\tau), f_z(\tau)$  – аналитические зависимости, формирующие параметрические сплайны третьего порядка;  $\tau \in [0, 1]$  – параметрическое время, определяющее текущее положение программной точки траектории. Продифференцируем выражение (1) по  $\tau$ , чтобы получить зависимость скорости изменения  $\tau$  от скорости  $v^*(t)$  движения схвата ММ [10]:

$$\begin{cases} \dot{x}^* = \frac{df_x(\tau)}{d\tau} \dot{\tau} = F_x(\tau) \dot{\tau}, \\ \dot{y}^* = \frac{df_y(\tau)}{d\tau} \dot{\tau} = F_y(\tau) \dot{\tau}, \\ \dot{z}^* = \frac{df_z(\tau)}{d\tau} \dot{\tau} = F_z(\tau) \dot{\tau}, \end{cases} \quad (2)$$

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

Величина  $E(t)$  (см. рис. 1) рассчитывается по формуле:

$$E(t) = k_x |\varepsilon_{ax}| + k_y |\varepsilon_{ay}| + k_z |\varepsilon_{az}|, \quad (3)$$

где  $K = (k_x, k_y, k_z)^T$  – вектор весовых переменных коэффициентов. Использование взятых по модулю элементов вектора  $\varepsilon_a(t)$  в выражении (3) позволяет снижать скорость схвата ММ в зависимости от возможностей НПА стабилизировать свое положение по некоторым степеням свободы.

Текущие значения коэффициентов вектора  $K$  зависят от положения схвата ММ на траектории и изменяются в диапазоне  $\{1, k_{x \max, y \max, z \max}\}, k_{x \max, y \max, z \max} \geq 1$ . Причем максимальные значения  $k_{x \max, y \max, z \max}$  выбираются экспериментально таким образом, чтобы обеспечивалось ограничение скорости  $v^*(t)$  как на удаленных от основания ММ участках траектории, когда вытянутый манипулятор оказывает значительные динамические воздействия на НПА, так и на тех участках траектории, при движении схвата по которым НПА не будет способен эффективно компенсировать оказываемые на него воздействия. В результате коэффициент  $k_x$  с учетом значения координаты  $x$  текущего положения схвата ММ в СК  $X_0 Y_0 Z_0$  определяется с помощью выражения:

$$k_x = \frac{|x|(k_{x \max} - 1)}{|x_{\max}|} + 1, \quad (4)$$

где  $|x_{\max}|$  – максимально возможное значение координаты  $x$  по оси  $X_0$  в пределах рабочей зоны ММ. Коэффициенты  $k_y, k_z$  вычисляются аналогично выражению (4).

На основе величины  $E(t)$  регулятор  $R$  формирует значение  $v^*(t)$ . На его вход поступает сигнал  $\xi(t) = e_{on} - E(t)$ . Принцип работы этого регулятора заключается в следующем. Если  $\xi(t) < 0$ , то справедливо неравенство  $e_{on} < E(t)$  и  $R$  будет уменьшать  $v^*(t)$ . Это приведет к уменьшению составляющих вектора  $\varepsilon_a(t)$  и величины  $E(t)$ , а вместе с этим произойдет уменьшение величин сил и моментов, с которыми ММ воздействует на НПА. Если  $\xi(t) > 0$ , то справедливо  $e_{on} > E(t)$  и  $R$  будет увеличивать  $v^*(t)$ . Стоит отметить, что величина  $v^*(t)$  не должна быть отрицательной [8].

Для синтеза регулятора  $R$  необходимо описать неизменяемую часть системы (на рис. 1 выделена пунктиром), которая будет являться объектом управ-

ления для этого регулятора. Для этого можно использовать подход, применявшийся в работах [8, 11], суть которого заключается в замене нелинейных зависимостей, описывающих эту систему, линейными зависимостями с переменными коэффициентами.

Вектор  $\varepsilon_a(t)$  динамической ошибки схвата ММ может быть записан как:

$$\varepsilon_a(t) = F_D(Q^*) - F_D(Q), \quad (5)$$

где  $F_D(Q(t)) \in R^3$  – функция, описывающая решение ПЗК.

Полагая, что в приводах ММ используются высокоточные СУ [9], выражение (5) можно записать в виде [8]:

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

где  $\varepsilon(t) \in R^n$  – вектор динамических ошибок каждого привода  $n$ -степенного ММ,  $F_{FD} \in R^{3 \times n}$ . Тогда выражение (3) будет иметь вид:

$$E(t) = k_x \left| \sum_{i=1}^n k_{FD_{1i}} \varepsilon_i \right| + k_y \left| \sum_{i=1}^n k_{FD_{2i}} \varepsilon_i \right| + k_z \left| \sum_{i=1}^n k_{FD_{3i}} \varepsilon_i \right|, \quad (6)$$

где  $k_{FD_{ji}}$  – текущие значения элементов матрицы  $F_{FD}$ .

Далее в выражении (6) заменим элементы матрицы  $F_{FD}$  на  $\tilde{k}_{FD}$  – максимально возможное значение элементов матрицы  $F_{FD}$ , т.е.  $\tilde{k}_{FD} = \max |k_{FD_{ji}}|, j = 1, 3, i = 1, n$ . Тогда (6) можно представить как:

$$\begin{aligned} E(t) &= k_x \left| \sum_{i=1}^n k_{FD_{1i}} \varepsilon_i \right| + k_y \left| \sum_{i=1}^n k_{FD_{2i}} \varepsilon_i \right| + k_z \left| \sum_{i=1}^n k_{FD_{3i}} \varepsilon_i \right| = \\ &= \tilde{k}_{FD} (k_x + k_y + k_z) \left| \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right| = \tilde{k}_{FD} k_m \left| \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right|, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k_m = k_{x \max} + k_{y \max} + k_{z \max}$ .

Использование адаптивных СУ приводами подводного ММ [9] 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 (7) можно переписать в виде:

$$E(s) = \tilde{k}_{FD} k_m \sum_{i=1}^n \Phi_{ei}(s) q_i^*(s) \text{sign}(\varepsilon_i). \quad (8)$$

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. В результате выражение (8) будет иметь вид:

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

Вектор обобщенных координат ММ, записанный в области изображений, с учетом выражения (2) может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} Q^*(s) &= \frac{\partial F_I}{\partial X^*} \dot{X}^* / s = \\ &= \left[ \frac{\frac{\partial F_I}{\partial X^*} \mathbb{F}(\tau)}{\sqrt{F_x^2(\tau) + F_y^2(\tau) + F_z^2(\tau)}} \right] v^*(s) / s = k_v v^*(s) / s, \end{aligned} \quad (9)$$

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

В таком случае  $E(s)$  будет иметь вид:

$$E(s) = \tilde{k}_{FD} k_m \Phi_{em}(s) \frac{v^*(s)}{s} \sum_{i=1}^n |k_{vi}|$$

С учетом описанного выше передаточная функция неизменяемой части системы примет вид:

$$W(s) = \frac{E(s)}{v^*(s)} = \tilde{k}_{FD} k_m \frac{\Phi_{em}(s)}{s} \sum_{i=1}^n |k_{vi}|. \quad (10)$$

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

Зная параметры модели объекта управления, которая описывается выражением (10), можно синтезировать регулятор  $R$ , 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 удержания над объектом работ, и ММ типа PUMA, который закреплен под центром водоизмещения НПА и движется вдоль заданной траектории. Описание математических моделей многозвенника и аппарата было подробно приведено в работах [9, 12, 13].

Используемые НПА и ММ схематично изображены на рис. 2, где введены следующие обозначения:

ния:  $OXYZ$  – абсолютная СК;  $CX_cY_cZ_c$  – связанная с НПА СК;  $X_0Y_0Z_0$  – СК, связанная с основанием ММ;  $q_{1...5}$  – обобщенные координаты ММ;  $P_{1...6}$  – тяги, создаваемые приводами НПА;  $h, l, k$  – геометрические параметры компоновки движителей НПА;  $d_0 \in R^3$  – вектор, определяющий положение основания ММ в СК  $X_cY_cZ_c$ . Параметры используемых НПА и ММ, а также присоединенных к ним масс жидкости определены в таблице.

Из таблицы видно, что НПА имеет вытянутую вдоль продольной оси форму, и в этом случае он более подвержен возникновению нежелательного крена при работе ММ. Движители  $P_5, P_6$  (см. рис. 2) отвечают за управление НПА по крену и за смещение по оси  $CY_c$ . Конфигурация этой пары движителей определяется величиной  $h$  (см. таблицу), значение которой втрое меньше соответствующих значений величин  $l$  и  $k$  (см. таблицу). Из этого следует, что используемый НПА обладает ограниченными возможностями управления креном.

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

$$W_n(s) = \frac{q_i(s)}{q_i^*(s)} = \frac{k_n}{(T_1s + 1)s} \quad (11)$$

Высокоточные СУ приводами ММ [9] за счет использования адаптивных корректирующих устройств позволяют стабилизировать параметры электроприводов подводного ММ на номинальном уровне. Поэтому передаточная функция (11) 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:

$$\Phi_{em}(s) = \frac{1}{1 + W_n(s)} = 0.0143 \frac{(0.006s + 1)s}{(0.0142s + 1)(0.00008s + 1)} \quad (12)$$

Максимальные значения коэффициентов  $k_x, k_y, k_z$  определены экспериментально с учетом конструктивных особенностей НПА: если  $\varepsilon_{ay} = 0$ , то  $k_{x\max} = k_{z\max} = 1.5$ ; если  $|\varepsilon_{ay}| > 0$ , то  $k_{x\max} = 1.5, k_{y\max} = k_{z\max} = 4.5$ .

Основные параметры НПА и ММ

Параметры		Величины
Масса НПА, кг		170
Тензор инерции НПА, кгм <sup>2</sup>		diag (10.2, 23.4, 23.4)
Центр масс НПА, м		[0;0;0.05]
Тензор инерции присоединенной жидкости, кгм <sup>2</sup>		diag (15, 185, 185, 5, 19,6, 19,6)
$h$ , м		0.1
$l$ , м		0.3
$k$ , м		0.3
$d_0$ , м		[0; 0; 0.15]
Линейные гидродинамические коэффициенты (поступательное движение)		[18; 105; 105]
Линейные гидродинамические коэффициенты (вращательное движение)		[20; 80; 80]
Квадратичные гидродинамические коэффициенты (поступательное движение)		[18; 105; 105]
Квадратичные гидродинамические коэффициенты (вращательное движение)		[20; 80; 80]
Звено ММ 1	Масса, кг	0.4
	Длина, м	0.05
	Масса присоединенной жидкости, кг	0.1
Звено ММ 2	Масса, кг	4
	Длина, м	0.5
	Масса присоединенной жидкости, кг	1.076
Звено ММ 3	Масса, кг	3
	Длина, м	0.4
	Масса присоединенной жидкости, кг	0.86
Звено ММ 4	Масса, кг	0.4
	Длина, м	0.05
	Масса присоединенной жидкости, кг	0.1
Звено ММ 5	Масса, кг	0.4
	Длина, м	0.05
	Масса присоединенной жидкости, кг	0.1

С учетом (9) 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 схвата ММ в пространстве. Эта траектория описывается двумя окружностями, заданными в плоскостях  $OXZ$  и  $OYZ$  абсолютной СК (рис. 3). Движение ММ по указанной траектории происходило следующим образом. Вначале ММ совершал два оборота по окружности радиусом 0.25 м в плоскости  $OXZ$ , затем переходил в плоскость  $OYZ$ , где также делал два оборота по окружности радиусом 0.25 м. Выбранная траектория позволяет показать, как движение ММ по одним и тем же траекториям, но расположенным в разных частях рабочей зоны ММ, влияет на точность работы многозвенника.

В результате максимальные по модулю значения элементов вектора  $k_v$ :  $|k_{v1}| = 3.1, |k_{v2}| = 2.14, |k_{v3}| = 3$ . Тогда с учетом вышеописанного соответствующие коэффициенты будут иметь следующие значения:  $\tilde{k}_{FD} = 1; \sum_{i=1}^n |\tilde{k}_{vi}| = 8.24; k_m = 10.5$ . Выбранное значение величины  $e_{on} = 0.0035$ , которая является опорной для регулятора  $R$  (см. рис. 1), сопоставимо с желаемой точностью позиционирования схвата ММ в связанной с ним СК.

С учетом выражения (12), а также полученных значений коэффициентов передаточная функция неизменяемой части системы (10) примет вид:

$$W(s) = \frac{1.24(0.006s + 1)}{(0.0142s + 1)(0.00008s + 1)} \quad (13)$$

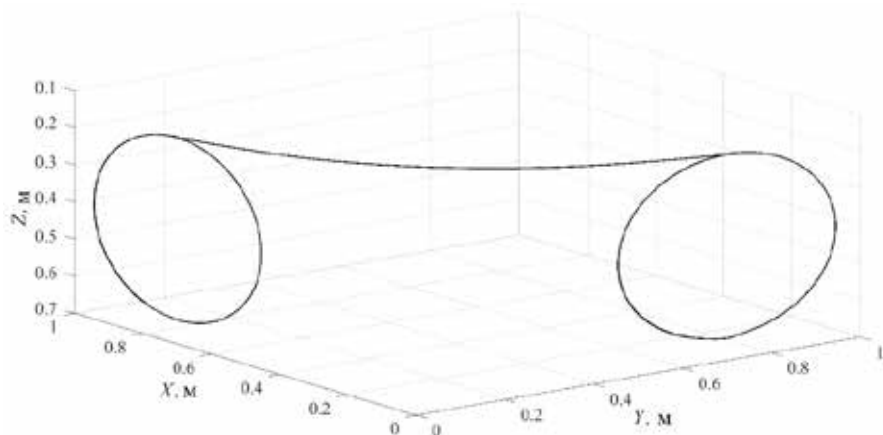


Рис. 3. Траектория движения ММ в абсолютной СК

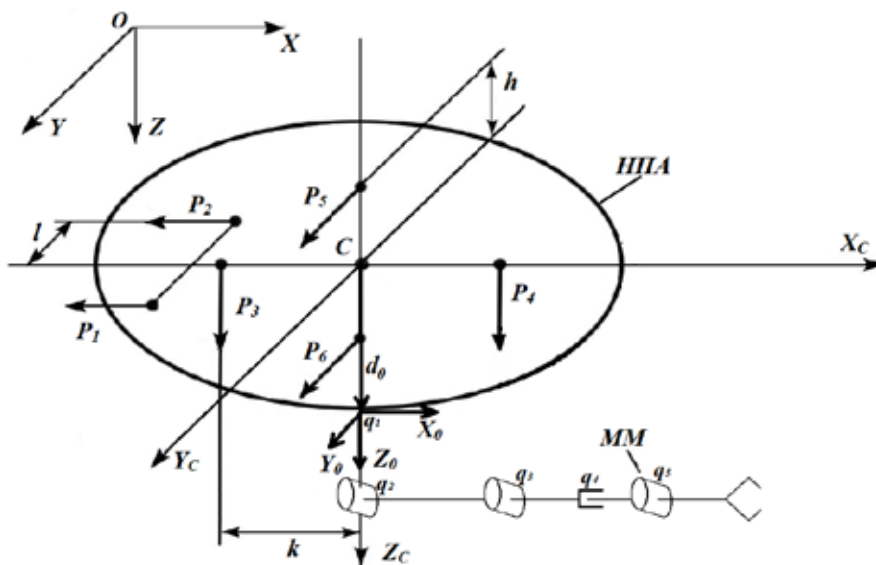


Рис. 2. Схема расположения движителей и ММ на НПА

Система с передаточной функцией вида (13) не будет терять устойчивость при различных коэффициентах усиления, однако для придания системе заданных показателей качества был синтезирован регулятор  $R$ , который имеет вид аperiодического звена:

$$W_R(s) = \frac{400}{0.5s + 1} \quad (14)$$

Исследование логарифмических амплитудно- и фазово-частотной характеристик передаточной функции (13) с регулятором  $R$ , описанным передаточной функцией (14), доказывает устойчивость полученной системы при замыкании ее единичной отрицательной обратной связью и обеспечивает заданное качество ее работы при движении ММ по предписанным пространственным траекториям.

### 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).

В процессе моделирования НПА находился в режиме динамического удержания [14, 15] в толще воды. ММ совершал характер-

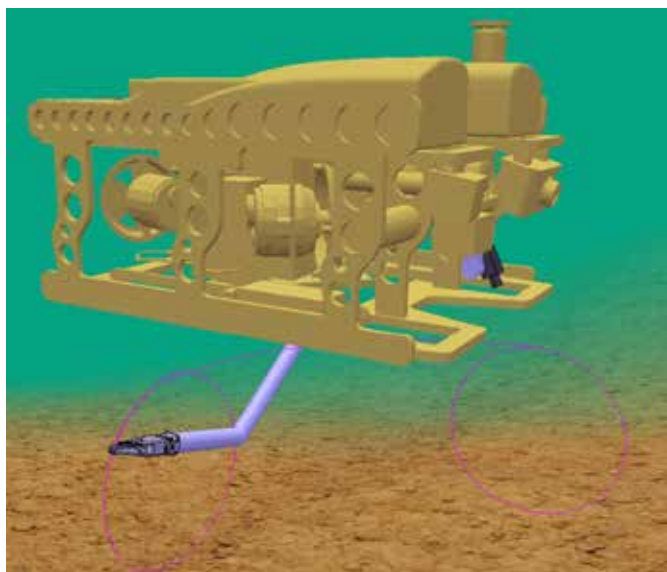


Рис. 4. Сцена в симуляторе CoppeliaSim

ные движения вдоль пространственной траектории (см. рис. 3), расположенной в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в абсолютной СК.

Было принято, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) центры абсолютной и связанной с НПА СК совпадали. Время движения по траектории составляло 26.3 с.

На рис. 5, а показаны евклидовы нормы  $\|\varepsilon\|$  векторов  $\varepsilon \in R^3$  отклонений схвата ММ от заданной траектории (см. рис. 3) в абсолютной СК в двух случаях моделирования: при движении схвата с постоянной скоростью 0,28 м/с без использования разработанной СУ скоростью движения схвата ММ (пунктирная кривая), а также с использованием этой СУ (сплошная кривая).

Без использования предложенной СУ величина  $\|\varepsilon\|$  на первом участке траектории в плоскости  $OYZ$  не превышает 6 мм, а при движении в плоскости  $OYZ$  отклонение достигает 1.7 см. С использованием СУ

скоростью движения ММ на протяжении всей траектории величина  $\|\varepsilon\|$  не превышает 0.95 см (рис. 5, а, сплошная кривая). Использование этой СУ позволяет сократить величину отклонения схвата более чем на 45% на отдельных участках траектории – в плоскости  $OYZ$ , где влияние ММ на НПА наиболее выражено ввиду описанных выше особенностей НПА.

На рис. 5, б представлены графики скорости движения схвата ММ: пунктирная кривая – движение с постоянной скоростью; сплошная кривая – переменная скорость при использовании СУ скоростью движения схвата. Из этого рисунка видно, что при использовании разработанной СУ на первом участке траектории в плоскости  $OYZ$  программная величина скорости движения  $v^*(t)$  достигала 0.43 м/с. При этом отклонения на большей части этого участка траектории не превышали 6 мм (рис. 5, а). При переходе схвата в плоскость  $OYZ$  СУ сначала снизила скорость за счет появления  $\varepsilon_{ay}$  – составляющей динамической ошибки по оси  $OY$  и изменения составляющей  $\varepsilon_{az}$  (рис. 6) в СК ММ. Также в зависимости от удаления схвата от основания ММ изменялись коэффициенты  $k_y$  и  $k_z$ , и скорость движения схвата дополнительно снижалась на наиболее удаленных участках траектории.

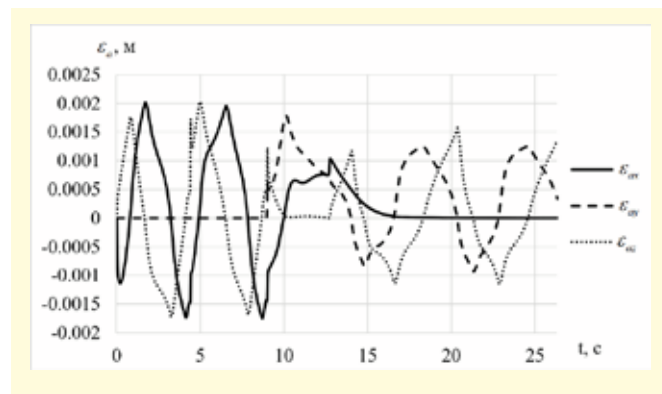


Рис. 6. Графики изменения величин элементов вектора  $\varepsilon_a$

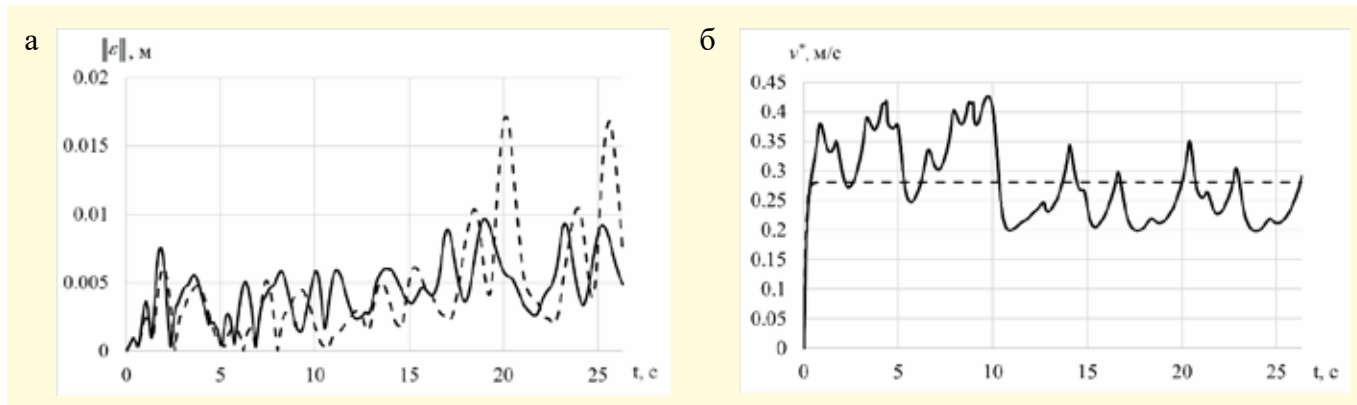


Рис. 5. Отклонения схвата ММ от траектории в абсолютной СК (а) и графики изменения скорости движения схвата ММ (б)

Таким образом, результаты численного моделирования подтвердили работоспособность разработанной СУ скоростью движения схвата ММ и показали увеличение точности выполнения манипуляционных операций подводным ММ, установленным на НПА.

## Заключение

Разработанная СУ скоростью движения схвата ММ, установленного на удерживающийся в режиме зависания НПА, позволяет увеличить точность движения схвата ММ по заданным пространственным траекториям. За счет использования дополнительного контура управления обеспечивается автоматическое снижение скорости схвата, когда аппарат из-за

конструктивных особенностей не может эффективно стабилизировать свое положение по некоторым степеням подвижности. При этом указанная скорость автоматически увеличивается на тех участках траектории, при движении по которым и СУ приводами ММ, и система стабилизации НПА способны обеспечивать желаемую точность движения схвата ММ в абсолютной СК. Результаты проведенного моделирования подтвердили работоспособность разработанной системы управления и показали эффективность ее использования для повышения точности выполнения подводных манипуляционных операций.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-21-00630, <https://rscf.ru/project/22-21-00630/>

## Литература

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю., Шувалов Б.В. Подход к выполнению АНПА технологических манипуляционных операций с различными подводными объектами // Подводные исследования и робототехника. 2019. №1. С. 31–37.
3. McLain T. W., Rock S. M. and Lee M. J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system // Underwater Robots. 1996. P. 139–158.
4. 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.
5. Dunnigan M.W., Russell G.T. Evaluation and reduction of the dynamic coupling between a manipulator and an underwater vehicle // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1998. Vol. 23. No. 3. P. 260–273.
6. Sarkar N., Podder T.K. Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems subject to drag optimization // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2001. Vol. 26. No. 2. P. 228–239.
7. Kang J.I. et al. Experimental study of dynamic stability of underwater vehicle-manipulator system using zero moment point // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 25. No. 6. P. 18.
8. 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.
9. 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.
10. Filaretov V., Gubankov A. and 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). 2016. С. 93–96.
11. Филаретов В.Ф., Юхимец Д. А. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 99–107.
12. 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.
13. Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. Система поддержки деятельности операторов манипуляторов, установленных на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 18–27.
14. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Development of Control Systems for Implementation of Manipulative Operations in Hovering Mode of Underwater Vehicle // OCEANS 2016. Shanghai, China. International IEEE Conference. 2016. P. 7485692.
15. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.

## Об авторах

**КОНОПЛИН Александр Юрьевич**, к.т.н., заведующий лабораторией  
Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем морских технологий ДВО РАН; Дальневосточный федеральный университет  
**Адрес:** 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а  
**Научные интересы:** автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы  
**Тел.:** +7 (924) 429-83-96  
**E-mail:** konoplin@marine.febras.ru  
**ORCID:** 0000-0001-7554-100

**КРАСАВИН Никита Андреевич**, и. о. м. н. с.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем морских технологий ДВО РАН  
**Адрес:** 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а  
**Научные интересы:** автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы  
**Тел.:** 89025063014  
**E-mail:** krasavin.na@students.dvfu.ru  
**ORCID:** 0000-0003-1102-5409