

**Е.Ю. Смирнова, Д.К. Серов, Д.К. Пельменев, Н.П. Коренко, А.Ю. Никулина**

### **МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БИОМОРФНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ**

*В настоящее время активно развивается область подводной робототехники для решения прикладных и исследовательских задач. Одним из перспективных направлений применения подводных роботов является использование конструкций с биоподобным типом плавания. Использование автономных биоморфных подводных роботов (БПР) потенциально позволит расширить область применения малошумных и безопасных для местной фауны подводных роботов для задач мониторинга и исследования местности. Целью работы является разработка и апробация методики модельно-ориентированного проектирования системы управления движением БПР. В рамках данной работы рассмотрена типовая конструкция туниморфного БПР с осцилляторным типом плавания. На примере рассматриваемой конструкции БПР описаны проблемные вопросы моделирования динамики БПР, а также синтеза их систем управления. Для БПР с осцилляторным типом плавания выделены типовые технологические операции (ТОП), выполняемые с учетом конструктивных особенностей БПР и состава их движительно-рулевого комплекса (ДРК). Предложена методика проектирования системы управления БПР на базе совместного использования технологий численного моделирования и классической теории автоматического управления (ТАУ). На основании предложенной методики разработана численная гидродинамическая модель движения туниморфного БПР с осцилляторным типом плавания. Проведены идентификационные вычислительные эксперименты, в рамках которых сняты переходные процессы, характеризующие динамику движения БПР при выполнении каждой отдельной ТОП. На основании проведенных экспериментов разработаны кибернетические модели движения БПР, позволяющие за счет упрощенного моделирования динамики с использованием типовых звеньев теории автоматического управления с переменными коэффициентами воспроизвести движение БПР в рамках выполнения типовых технологических операций. В рамках кибернетических моделей в соответствии с предложенной методикой проведен синтез алгоритмов управления движением БПР для каждой из типовых технологических операций с использованием методов численной оптимизации. Выполнена апробация разработанных алгоритмов на базе вычислительных экспериментов, проведенных в рамках численных гидродинамических моделей. Определены достоинства предложенной методики, а также сформулированы возможные перспективы применения БПР.*

*Биоморфные подводные роботы, БПР; численная гидродинамическая модель; CFD-модель; кибернетическая модель.*

**E.Y. Smirnova, D.K. Serov, D.K. Pelmenev, N.P. Korenko, A.Y. Nikulina**

### **MODEL-BASED BIOMORPHIC UNDERWATER ROBOTS SYSTEM CONTROL DESIGN**

*Currently, the field of underwater robotics is actively developing to solve applied and research problems. One of the promising areas of underwater robots' application is the implementation of bioinspired type of swimming. The use of autonomous bioinspired underwater vehicles (BUV) will potentially expand the scope of application of low-noise and safe for local fauna underwater robots for monitoring and exploring the terrain. The aim of the work is to develop and test a methodology for model-based design of a motion control system for biomorphic underwater robots. In this work a typical BUV design with oscillatory type of swimming is considered. Problematic issues of modeling the BUV dynamics, as well as the synthesis of their control systems are described. For BUVs with oscillatory types of swimming, typical technological operations are identified. Typical technological operations are chosen based on the design features of the BUVs and the composition of their propulsion and steering complex. A control system design methodology based on the combined use of numerical modeling technologies and classical automatic control theory is proposed. Based on the proposed methodology, numerical hydrodynamic BUV's models with oscillatory types of swimming are developed. Identification computational experiments are conducted. The transient processes which characterize BUV's dynamics during the performance of each typical operation are defined. Based on the simulation results, cybernetic simplified models of BUV's based on the typical blocks of the automatic control theory are developed. Based on the cybernetic models, based on the numerical optimization a synthesis of BUV's control system in accordance with the proposed methodology is performed. The developed algorithms are tested based on numerical hydrodynamic simulation results. Possible prospects for the use of the BUV's are formulated.*

*Bioinspired underwater vehicles; BUV; computational fluid dynamics model; CFD model; cybernetic model.*

**Введение.** В настоящее время область подводной робототехники активно развивается, растет степень автономности подводных роботов и расширяется спектр их применения. Одной из наиболее перспективных задач в подводной робототехнике является применение подводных роботов с биоморфным типом движения. Биоморфные подводные роботы (БПР) активно применяются для мониторинга китайских акваторий за счет бесшумного характера их движения и безопасности для окружающих [1].

Одной из наиболее нетривиальных задач, возникающих при проектировании подводных роботов, является сложность разработки их системы управления в условиях нестационарного характера водной среды, ограничений бортового вычислительного и измерительного комплексов. Принципиальную роль при проектировании системы управления с учетом функционирования объекта управления в данных экстремальных условиях играет математическое моделирование, позволяющее провести синтез и апробацию алгоритмов управления до непосредственной реализации на борту подводного робота.

Для типовых подводных роботов, оснащенных винтовыми движителями, классическим подходом к математическому моделированию является описание динамики робота в соответствии с уравнениями динамики твердого тела, а гидродинамики обтекающей его жидкости – в виде упрощенных аналитических зависимостей, выраженных в виде дополнительных слагаемых в данных уравнениях, таких как силы присоединенных масс, остаточной плавучести, гидродинамического сопротивления и метацентрические моменты [2–4].

Тем не менее, для БПР данный подход не является эффективным в связи с тем, что аналитическое описание воздействия биоморфных движителей на динамику подводного робота в общем виде не поддается аналитическому описанию. Несмотря на то, что существуют различные подходы к моделированию биоподобного движения, например, модель Лайтхилла, (модель удлиненного тела) [5] и модель Гамильтона [6], они не обладают достаточной точностью для учета возможных неустойчивых режимов движения БПР. По этой причине синтез алгоритмов управления движением БПР на базе данных математических моделей можно считать нецелесообразным.

В связи с этим в данной работе предложен методика синтеза системы управления движением БПР, базирующаяся на использовании численных гидродинамических и кибернетических моделей. Результативность применения предложенной методики продемонстрирована на примере управления движением биоморфных подводных роботов осцилляторного типа плавания.

**Описание методики модельно-ориентированного проектирования.** С учетом недостатков подходов к аналитическому моделированию динамики БПР в рамках данной работы предлагается проводить синтез алгоритмов управления движением БПР на численных гидродинамических и кибернетических моделях.

Под гидродинамической моделью БПР подразумевается математическая модель робота, в рамках которой динамика робота описывается уравнениями динамики твердого тела, а гидродинамика окружающей жидкости – методами численного моделирования [7]. Данный подход предполагает разбиение жидкой среды вокруг робота на элементарные частицы. При этом параметры, характеризующие динамику каждой из данных элементарных частиц, изменяются на каждой итерации расчета в зависимости от параметров соседних частиц на основании уравнений Навье-Стокса [8]. Гидродинамические модели позволяют наиболее точно воспроизводить динамику БПР в водной среде, однако в общем виде не поддаются аналитическому анализу, а также обладают крайне низким быстродействием, в результате чего математические эксперименты в рамках данных моделей занимают на несколько порядков больше времени, чем аналогичные натурные.

На первом этапе предложенной методики на основании геометрических и массоинерционных характеристик БПР разрабатывается гидродинамическая математическая модель. В рамках данной модели геометрия БПР импортируется в специализированное программное обеспечение, например «Логос», в виде абсолютно твердого препятствия, перемещающегося в расчетной области за счет реализации алгоритмов деформации расчетной сетки. Таким образом, даже без проведения идентификационных натурных испытаний возможно получение математической модели, динамика которой будет максимально приближена к динамике реального робота.

Далее на основании результатов экспериментов на гидродинамической модели выделяется перечень типовых технологических операций, выполняемых роботом с учетом биоморфного характера его ДРК. С учетом того, что в общем случае динамика робота в биоморфными типами движителей не описывается аналитическими зависимостями, при синтезе алгоритмов управления БПР принято ограничить характер управления БПР определенными паттернами, гарантирующие устойчивость движения. Соответственно, для каждой из операций определяется характерный паттерн и характеризующие его параметры с учетом ограничений, накладываемых на конструкцию робота. Стоит отметить, что существуют различные публикации, направленные на получение заданного паттерна, в частности, с использованием алгоритмов CPG [9–11] или методов машинного обучения, например обучения с подкреплением [12–14]. Тем не менее, существенным недостатком данных подходов является необходимость в проведении значительных предварительных экспериментов для создания обучающей выборки, что может быть нецелесообразно в случае, когда система управления проектируется на этапе доработки конструкции.

Затем в рамках гидродинамической модели БПР проводятся идентификационные эксперименты с целью определения переходных процессов, характеризующих каждую из ТОП. Это позволяет на основании полученных экспериментальных данных построить упрощенные одноконтурные нелинейные математические модели, определенные на основании типовых звеньев теории автоматического управления. Параметры данных моделей в явном виде не интерпретируются физически, однако они обладают большей точностью нежели аналитические модели в связи с тем, что позволяют учесть нелинейные гидродинамические эффекты, возникающие при движении БПР.

В рамках полученных кибернетических моделей осуществляется синтез алгоритмов управления движением БПР с использованием методов оптимизации с учетом возможных возмущающих факторов, в условиях которых происходит функционирование БПР. Далее выполняется валидация алгоритмов управления движением БПР в рамках каждой ТОП на гидродинамической модели, по результатам которой возможна доработка кибернетических моделей и алгоритмов управления.

На основании разработанных ТОП определяются сценарии поведения, каждый из которых составляет заданную последовательность ТОП. В общем случае такой подход позволяет перейти от простых операций «движение вперед» и «разворот по курсу» к более сложным сценариям вида «движение в среде с препятствиями», на основании которых возможно выполнение целых миссий.

По результатам разработки алгоритмов управления поведением, который в простейшем случае может представлять собой конечный автомат, проводится валидация алгоритмов управления поведением на гидродинамической модели и в рамках натурных экспериментов.

Структурная схема, характеризующая предложенную методику модельно-ориентированного проектирования, представлена на рис. 1.

В последующих разделах работы приведен пример применения предложенной методики для решения задачи синтеза алгоритмов управления движением туниформного БПР.

**Описание рассматриваемой конструкции БПР.** В рамках данной работы рассматривалась типовая конструкция БПР туниформного типа с осцилляторным типом плавания, осуществляющая движение за счет поворота хвостовой части. При этом хвостовая часть которого обладает несколькими степенями подвижности в горизонтальной плоскости, что позволяет роботу осуществлять движение ею по параболической траектории.

На основании рассматриваемой конструкции была разработана редуцированная гидродинамическая численная модель, на основании которой в дальнейшем проводились вычислительные эксперименты и валидация разрабатываемых алгоритмов управления.

Внешний вид БПР с осцилляторным типом плавания и соответствующей ему гидродинамической модели приведен на рис. 2.

Как уже было сказано ранее, с целью упрощения процесса синтеза алгоритма управления, в рамках рассматриваемой математической модели предполагалось, что БПР осуществляет движение в соответствии с заданным паттерном движения. Для этого рассмотрим схему деформации гидродинамической модели движения БПР, представленную на рис. 3.

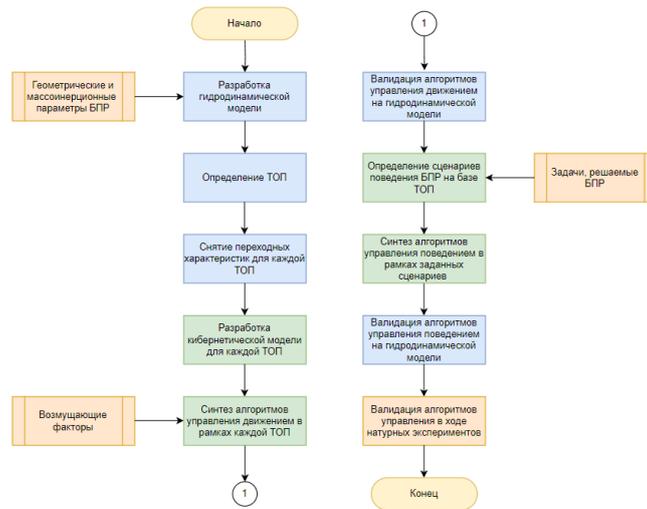


Рис. 1. Предложенная методика проектирования системы управления БПР



Рис. 2. Внешний вид туниморфного БПР (а) и соответствующей ему гидродинамической модели (б)

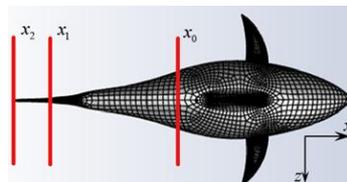


Рис. 3. Схема деформации гидродинамической модели движения БПР

Обозначения, используемые на рисунке:  $x_0$  – продольная координата начального участка деформации первой хвостовой части туниморфного БПР,  $x_1$  – продольная координата начального участка деформации второй части хвостового плавника БПР,  $x_2$  – продольная координата конечного участка деформации хвостовой части БПР.

В качестве заданного паттерна движения для перемещения БПР выбран синусоидальный закон колебаний хвостовой части, представленный ниже:

$$\begin{cases} z(x, t) = A(x_0 - x)^2 \sin(2\pi vt) + \tan(\alpha) \cdot (x_0 - x), & x_0 \geq x \geq x_1 \\ z(x, t) = A(x_0 - x_1)^2 \sin(2\pi vt) - A_2(x_1 - x) \cos(2\pi vt + \Delta\varphi) + \\ + \tan(\alpha) \cdot (x_0 - x_1), & x_2 \geq x \geq x_1 \end{cases} \quad (1)$$

где  $z, x$  – координаты соответствующего участка хвостовой части;  $A, A_2$  – амплитуда колебаний первого и второго участка хвостовой части БПР соответственно;  $v$  – частота колебаний хвостовой части БПР;  $\alpha$  – угол отклонения плоскости колебаний относительно продольной оси симметрии БПР,  $\Delta\varphi$  – заданное смещение фазы между колебанием первого и второго участков БПР.

В соответствии с представленным законом колебаний хвостовой части БПР (1) осуществляет колебание всей хвостовой частью по параболической траектории, при этом второй участок хвостовой части колеблется по линейной траектории, что позволяет в упрощенном виде воспроизвести реальное перемещение тунца.

Далее на основании представленной конструкции БПР были выделены следующие ТОП:

- ◆ движение в продольном направлении;
- ◆ плавный поворот по углу курса;
- ◆ быстрый поворот по углу курса;
- ◆ движение в вертикальном направлении.

Движение в продольном направлении (прямолинейное движение) реализуется путем колебаний хвостовой части с заданной амплитудой.

Плавный поворот по углу курса реализуется путем изменения плоскости колебания хвостовой части БПР относительно продольной оси симметрии, как показано на рис. 4,а. Это позволяет создать управляющий момент относительно вертикальной оси симметрии без снижения скорости прямолинейного движения БПР.

Быстрый поворот по углу курса реализуется путем смещения хвостовой части БПР в крайнее положение с дальнейшим прекращением колебаний, как показано на рис. 4,б. В такой конфигурации хвостовая часть БПР представляет собой аналог весла, замедляющего движение и разворачивающего туниформного БПР.

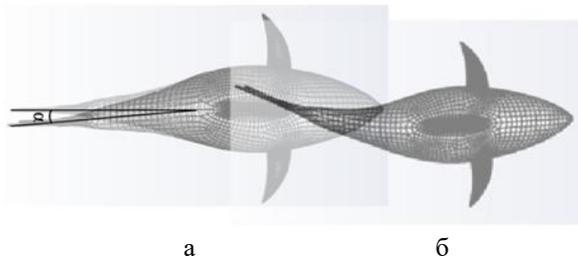


Рис. 4. Конфигурация БПР при плавном (а) и быстром (б) повороте по углу курса

Движение в вертикальном направлении может быть реализовано посредством изменения плавучести робота за счет вытеснения и набора воздуха или жидкости из корпуса робота, что аналогично принципу работы плавательного пузыря у реальных рыб.

**Синтез кибернетической модели.** Далее в соответствии с предложенной методикой для каждой из типовых операций необходимо было снять переходные процессы, характеризующие динамику движения БПР.

Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов на гидродинамической модели с различными значениями управляющих воздействий, подаваемых на вход закона колебаний хвостовой части (1). Ниже отдельно рассмотрен синтез кибернетических моделей для движения по линейным и угловым координатам.

В качестве управляющего воздействия для продольного движения была выбрана частота колебаний хвостовой части в связи с тем, что изменение данного параметра физически реализуемо, а также легко интерпретируемо в рамках гидродинамической модели. При движении в вертикальном направлении в качестве управляющего воздействия была выбрана остаточная плавучесть БПР.

В результате проведенных экспериментов на гидродинамической модели было выявлено, что в общем случае динамика движения БПР как при движении в продольном направлении, так и в вертикальном направлении может быть описана в виде передаточной функции для скорости, представляющей собой инерционное звено первого порядка с переменными параметрами вида:

$$W(s, u) = \frac{K(u) \cdot u}{T(u)s + 1} \quad (2)$$

где  $u$  – соответствующее управляющее воздействие,  $s$  – оператор дифференцирования,  $K, T$  – параметры передаточной функции.

Несмотря на то, что классический подход теории автоматического управления предполагает использование передаточных функций с постоянными параметрами, представляющие собой систему линейных дифференциальных уравнений [15, 16], в случае с сильно нелинейным характером динамики БПР, данный подход не позволяет получить модель, обладающую достаточной точностью.

Для аппроксимации зависимостей  $K(u)$  и  $T(u)$  были использованы полиномы второй степени вида

$$C(u) = k_2 \cdot u^2 + k_1 \cdot u + k_0, \quad (3)$$

где  $k_0, k_1, k_2$  – параметры аппроксимации  $C$  – название параметра.

Для поиска коэффициентов аппроксимации была использована оптимизация с использованием метода наименьших квадратов. Пример аппроксимации переходных процессов по линейной скорости движения БПР в вертикальном и продольном направлениях с использованием зависимости (2) приведен на рис. 5, а, б.

Для плавного разворота по курсу в качестве управляющего сигнала был выбран угол отклонения плоскости колебаний относительно продольной оси симметрии БПР  $\alpha$ . При этом в ходе экспериментов также была выявлена корреляция между частотой колебаний хвостовой части и угловой скоростью БПР. При выполнении быстрого поворота по курсу управляющее воздействие является релейным и принимает значение «1», когда БПР переходит в режим выполнения ТОП и «0», когда данный ТОП не выполняется. Тем не менее также присутствует корреляция между угловой скоростью БПР и скоростью движения на момент перехода к выполнению ТОП.

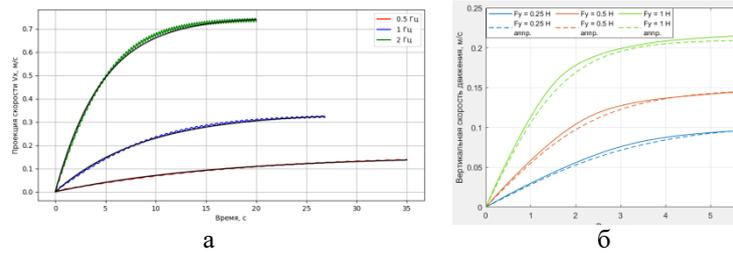


Рис. 5. Результаты аппроксимации зависимости продольной скорости движения  $v_x(v, t)$  (а) и вертикальной скорости движения  $v_y(F_y, t)$  (б)

Соответственно, для разработки кибернетической модели в ходе выполнения ТОП по повороту по углу курса была также исследована зависимость угловой скорости от линейной скорости движения и частоты колебаний хвостовой части, которые в полной мере не являются управляющими воздействиями при выполнении данных ТОП, но оказывают значительное на них влияние.

Пример графиков, полученных в ходе численных экспериментов на гидродинамической модели приведен на рис. 6.

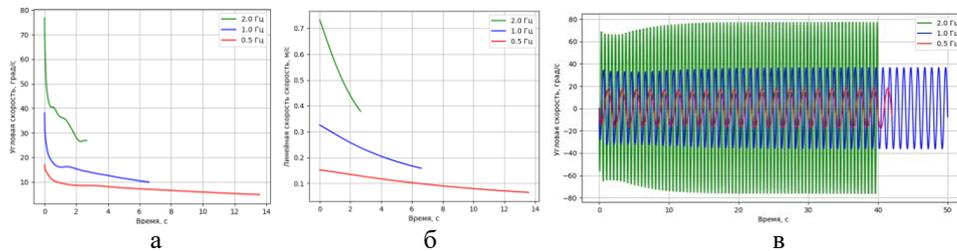


Рис. 6. Графики переходного процесса по угловой (а) и линейной (б) скорости при выполнении ТОП «быстрый поворот», а также по угловой скорости и  $\alpha = 2^\circ$  (а) при выполнении ТОП «плавный поворот» (в)

Исходя из полученных графиков можно сделать вывод, что при быстром повороте у БПР возникает мгновенная угловая скорость по углу курса, которая, тем не менее, ведет к мгновенному уменьшению скорости линейного движения. При выполнении операции «плавный поворот» БПР совершает колебания по угловой скорости, обусловленную колебательным характером движения по углу курса. При этом амплитуда колебаний зависит от частоты и в значительной степени превышает полезный сигнал, на основании которого возможно проанализировать среднее значение угловой скорости.

По этой причине исходные данные были отфильтрованы фильтром низких частот с целью выделения полезного сигнала, в результате чего были получены графики переходных процессов по угловой скорости для различных значений управляющих воздействий, представленные на рис. 7.

Исходя из полученных графиков (рис. 6, 7) можно сделать вывод, что переходные процессы по углу курса не описываются с использованием типовых звеньев ТАУ, в результате чего в данной работе было предложено использовать комбинацию звеньев. В частности, для описания динамики угловой скорости БПР по углу курса при выполнении ТОП «плавный поворот» была использована комбинация из трех типовых звеньев: двух дифференциальных и одного апериодического с переменными параметрами вида:

$$W(s, v, \alpha) = K_{\varphi}(v, \alpha) \left( \frac{1}{T_1(v, \alpha)^2 s^2 + T_2(v, \alpha) s + 1} + \frac{K_d(v, \alpha) s}{T_d s + 1} - \frac{K_d(v, \alpha) s}{T_d s + \gamma} \right) \quad (4)$$

где  $T_1, T_2, K_d, T_d, \gamma, K_{\varphi}$  – параметры звена.

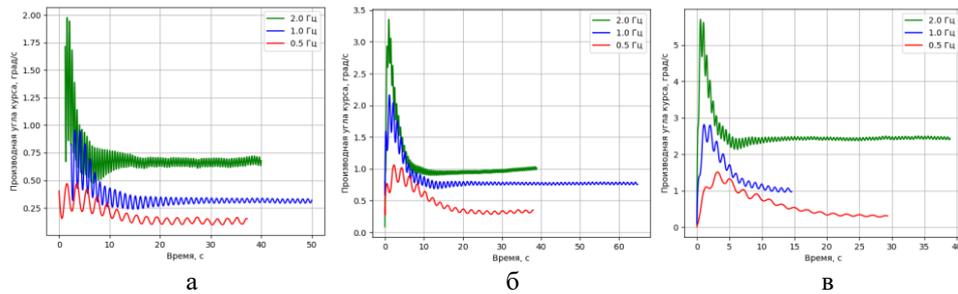


Рис. 7. Графики отфильтрованной угловой скорости при выполнении ТОП «плавный разворот» при  $\alpha = 2^\circ$  (а),  $5^\circ$  (б) и  $7^\circ$  (в)

Постоянные параметры данной функции ( $\gamma, T_d$ ) были определены методом оптимизации, исходя из предположения, что остальные параметры тоже являются постоянными. Для аппроксимации переменных параметров ( $T_1, T_2, K_d, K_{\varphi}$ ) были использованы функциональные зависимости второй степени вида:

$$C(\alpha, v) = k_{20} \alpha_1^2 + k_{10} \alpha + k_0 + k_{11} v \alpha + k_{01} v + k_{02} v^2, \quad (5)$$

где  $k_{20}, k_{10}, k_0, k_{11}, k_{01}, k_{02}$  – параметры аппроксимации.

Представленный нелинейный аналог комбинации типовых передаточных функций (4) позволил упрощенно представить динамику БПР при повороте по углу курса с довольно высокой точностью. Примеры аппроксимации угловой скорости в рамках выполнения ТОП «плавный поворот» приведены на рис. 8, а, б.

При выполнении ТОП «быстрый поворот» в связи с характерно наблюдаемыми участками мгновенного и плавного изменения угловой скорости (рис. 6) динамика изменения угловой скорости была описана в виде:

$$\omega_y(t, v_0^x) = \begin{cases} t < t_d(v_0^x), & \omega_0^y(v_0^x) - K_{\omega}(v_0^x) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1(v_0^x)}} \right) \\ t \geq t_d(v_0^x), & \left( \omega_0^y(v_0^x) - K_{\omega}(v_0^x) \right) \cdot e^{-\frac{t_d(v_0^x) - t}{T_2(v_0^x)}} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $t$  – время с начала ТОП,  $v_0^x$  – скорость движения в продольном направлении в момент начала ТОП,  $\omega_y$  – угловая скорость поворота по курсу,  $t_d$  – время перехода с режима мгновенного изменения скорости на режим плавного изменения скорости,  $\omega_0^y$  – угловая скорость по курсу в момент начала ТОП,  $K_\omega, T_1, T_2$  – параметры, характеризующие динамику БПР.

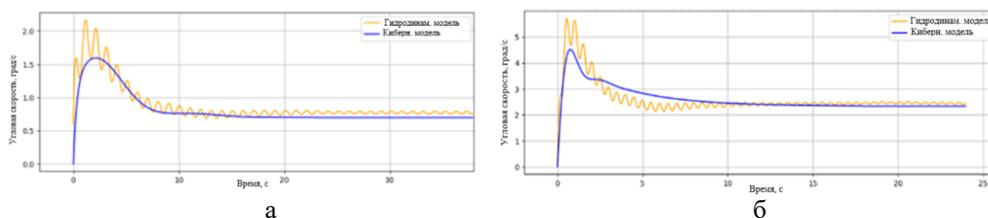


Рис. 8. Результаты аппроксимации зависимости угловой скорости  $\omega(\alpha, \nu, t)$  в ходе выполнения ТОП «плавный поворот» при  $\alpha = 5^\circ, \nu = 1$  Гц (а),  $\alpha = 7^\circ, \nu = 2$  Гц (б)

Параметры нелинейного динамического звена (6) также были аппроксимированы на основании проведенных гидродинамических экспериментов. Так, функциональные зависимости  $\omega_0^y(v_0^x), K_\omega(v_0^x)$  были аппроксимированы в виде полинома второго порядка (3). Функциональные зависимости  $K_\omega(v_0^x), T_1(v_0^x)$  и  $T_2(v_0^x)$ , в свою очередь, были аппроксимированы гиперболической зависимостью вида:

$$C(v_0^x) = \frac{k_{hyp}}{v_0^x + \gamma_{hyp}}, \quad (7)$$

где  $k_{hyp}, \gamma_{hyp}$  – параметры гиперболической аппроксимации.

Пример аппроксимации зависимости угловой скорости в рамках выполнения ТОП «быстрый поворот» приведен на рис. 9.

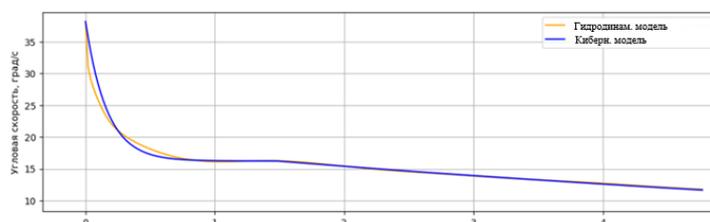


Рис. 9. Результаты аппроксимации зависимости угловой скорости  $\omega(v_0^x, t)$  в ходе выполнения ТОП «быстрый поворот» при начальной линейной скорости 0,7 м/с

**Синтез и апробация алгоритмов управления движением БПР.** На основании приведенной выше кибернетической модели был проведен синтез алгоритмов управления для каждой из ТОП с учетом особенностей движительно-рулевого комплекса туннормфного БПР.

При управлении движением в продольном направлении принципиальными становятся вопросы обеспечения управляемости в условиях ограничений на максимальную частоту колебаний хвостовой части (составляющей для выбранной конструкции 2 Гц) и переменную дискретность управления, определенную заданным паттерном движения. В частности, в процессе синтеза алгоритма управления необходимо было учесть, что частоту колебаний хвостовой части можно менять только в момент перехода оси колебаний, в противном случае возникает нежелательный возмущающий момент по курсу. При синтезе алгоритма управления для ТОП «плавный поворот», в свою очередь, необходимо было учесть влияние частоты колебаний на величину угловой скорости.

С учетом данных ограничений был проведен структурный и параметрический синтез алгоритмов управления. Для управления движением в продольном и вертикальном направлениях с учетом кибернетической модели динамики (2) был выбран классический ПИ-регулятор по скорости. Для управления движением в ходе выполнения операции «быстрый разворот» был выбран релейный регулятор. Для управления поворотом по углу курса в ходе выполнения ТОП «быстрый разворот» был реализован модифицированный нелинейный ПД-регулятор вида

$$u = K_p(v)e + K_d\dot{e}, \quad (8)$$

где  $v$  – частота колебаний хвостовой части;  $K_p, K_d$  – параметры ПД-регулятора;  $u$  – управляющее воздействие регулятора;  $e$  – ошибка регулирования.

В данном случае нелинейная зависимость  $K_p(v)$ , позволяющая учесть взаимосвязь между контурами управления была представлена в виде кусочно-линейной зависимости, параметры которой были определены в ходе оптимизации алгоритмов управления. Оптимизация выполнялась с учетом нелинейных ограничений на управление в соответствии с классическим функционалом оптимизации вида [17, 18]:

$$f(e, t) = qe(t)^2 + ru(t)^2, \quad (9)$$

где  $q, r$  – весовые параметры оптимизации, назначенные пользователем.

В связи с тем, что объект управления даже в рамках кибернетической модели описывается сильно нелинейными зависимостями оптимизация выполнялась стохастическим методом с использованием роя частиц [19, 20]. В результате для каждой ТОП был определен соответствующий вектор параметров регуляторов в рамках кибернетической модели, после чего была произведена апробация полученных алгоритмов управления в рамках гидродинамической модели при ступенчато заданных параметрах скоростей и угла курса.

Результат апробации алгоритмов управления для каждой ТОП приведен на рис. 10. Для ТОП «быстрый разворот» в связи с релейным характером регулятора результата апробации аналогичен рис. 9, в связи с чем в данном случае не приводится.

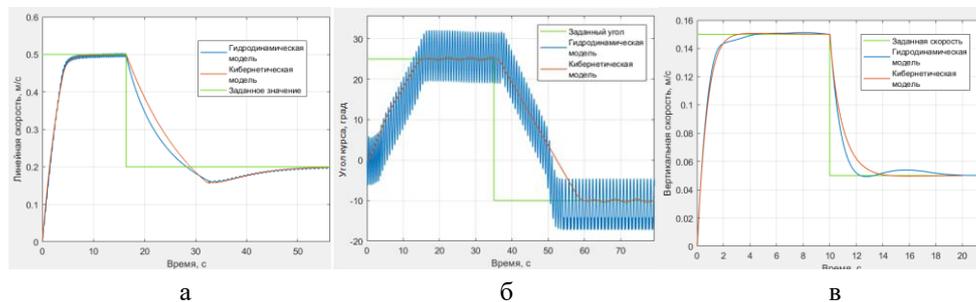


Рис. 10. Результат апробации алгоритмов управления в рамках ТОП «движение в продольном направлении» (а), «плавный поворот по курсу» (б), «движение в вертикальном направлении» (в)

**Заключение.** В рамках данной работы приведена методика модельно-ориентированного проектирования системы управления движением БПР. Элементами новизны предложенного решения по сравнению с известными подходами к проектированию системы управления движением БПР является комплексное применение гидродинамических и кибернетических моделей в процессе синтеза алгоритмов управления.

На примере синтеза алгоритмов управления движением туниморфного БПР продемонстрирована эффективность предложенной методики в ходе описания динамики движения БПР и проектирования системы управления.

Основным преимуществом предложенной методики является возможность проектирования системы управления на стадии разработки конструкции БПР, что позволяет значительно ускорить процесс их проектирования, а также повысить качество работы системы. К недостатку предложенной методики можно отнести необходимость выбора

паттерна движения для определения ТОП, что может ограничивает функциональность БПР, однако обеспечивает устойчивость движения. В рамках дальнейших работ планируется апробация предложенной методики в ходе проектирования системы управления поведением БПР, а также анализ применимости предложенной методики для управления БПР с ундуляторным типом плавания.

*Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Развитие теории модельно-ориентированного проектирования для задач создания трансформных робототехнических систем с использованием методов вычислительной механики и гидрогазодинамики» (FNRG-2025-0005 1024042600099-7-2.2.2;1.2.1).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiaofeng Z. *et al.* Review of research and control technology of underwater bionic robots // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – P. 1-28.
2. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. – Hoboken, NJ: Wiley, 2021. – 736 с.
3. Pshikhopov V., Gurenko B., Shapovalov I., Beresnev M. Development and research of path-planning module for control system of underwater vehicle // Internation Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2016. – Vol. 5, No. 4. – P. 301-304.
4. Пантов Е.Н., Махнин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
5. Gong Y. *et al* Investigating the Influence of Counter-flow Regions on the Hydrodynamic Performance of Biomimetic Robotic Fish // Biomimetics. – 2024. – Vol. 9, No. 425. – P. 1-19.
6. Yan X., Ma Y. A Distributed Control Method for Flexible Robotic Fish Based on PDE // IET Control Theory and Applications. – 2023. – Vol. 17. – P. 1930-1943.
7. Щур Н.А., Половко С.А., Деулин А.А. Применение методов вычислительной гидродинамики для получения характеристик переходных процессов АНПА // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, №4. – С. 287-295.
8. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: ОГИЗ, 1947. – 929 с.
9. Kastalsky I.A., Gordleeva S.Y., Hramov A.E., Kasantsev V.B. Bridging nonlinear dynamics and physiology: implications for CPGs and biomimetic robotics. Reply to comments on “control of movement of underwater swimmers: animals, simulated animates and swimming robots” // Physic of life reviews. – 2024. – Vol. 50. – P. 32-34.
10. Cafer Bal *et. al.* CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a biomi-metic robotic fish // Ocean Engineering. – 2019 – Vol. 189. – P. 1-24.
11. Ijspeert A. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review // Neural Networks. – 2008. – Vol. 21, Iss. 4. – P. 642-653.
12. Buşoniu L. *et al.* Reinforcement Learning for Control: Performance, Stability, and Deep Approximators // Annual Re-views in Control. – 2018. – Vol. 46. – P. 8-28.
13. Xiaozhu L., Xiaopei L., Yang W. Learning Agile Swimming: An End-to-End Approach without CPGs // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2025. – P. 1-8.
14. Jingdong L., Lynne E., Raj M. Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Fish // Studies in Computational Intelligence – 2007. – Vol. 50. – P. 121-135.
15. Горюнов В.В., Половко С.А., Щур Н.А. Технология создания кибернетических моделей для синтеза и отработки регуляторов системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 308-318.
16. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1975. – 413 с.
17. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems. – 1st ed. – New York: Wiley-Interscience, 1972. – 608 с.
18. Reshmi K.R., Priya P.S. Design and Control of Autonomous Unerwater Vehicle for Depth Control Using LQR Controller // International Journal of Science and Research. – 2016. – Vol. 5, Iss. 7. – P. 1432-1436.
19. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation // Journal of Artificial Evolution and Applications. – 2008. – Vol. 2008. – P. e685175.
20. Avriel M. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Nonlinear Programming. – Eaglewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 2003. – 548 p.

## REFERENCES

1. Xiaofeng Z. et al. Review of research and control technology of underwater bionic robots, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, pp. 1-28.
2. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Hoboken, NJ: Wiley, 2021, 736 p.
3. Pshikhopov V., Gurenko B., Shapovalov I., Beresnev M. Development and research of path-planning module for control system of underwater vehicle, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2016, Vol. 5, No. 4, pp. 301-304.
4. Pantov E.N., Makhinin N.N., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 216 p.
5. Gong Y. et al Investigating the Influence of Counter-flow Regions on the Hydrodynamic Performance of Biomimetic Robotic Fish, *Biomimetics*, 2024, Vol. 9, No. 425, pp. 1-19.
6. Yan X., Ma Y. A Distributed Control Method for Flexible Robotic Fish Based on PDE, *IET Control Theory and Applications*, 2023, Vol. 17, pp. 1930-1943.
7. Shchur N.A., Polovko S.A., Deulin A.A. Primenenie metodov vychislitel'noy gidrodinamiki dlya polucheniya kharakteristik perekhodnykh protsessov ANPA [Application of computational fluid dynamics methods to obtain characteristics of AUV transient processes], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 287-295.
8. Lamb G. Gidrodinamika [Hydrodynamics]. Moscow: OGIz, 1947, 929 p.
9. Kastalsky I.A., Gordleeva S.Y., Hramov A.E., Kasantsev V.B. Bridging nonlinear dynamics and physiology: implications for CPGs and biomimetic robotics. Reply to comments on “control of movement of underwater swimmers: animals, simulated animates and swimming robots”, *Physic of life reviews*, 2024, Vol. 50, pp. 32-34.
10. Cafer Bal et. al. CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a biomi-metic robotic fish, *Ocean Engineering*, 2019, Vol. 189, pp. 1-24.
11. Ijspeert A. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review // *Neural Networks*. – 2008. – Vol. 21, Iss. 4 – P.642-653.
12. Buşoniu L. et al. Reinforcement Learning for Control: Performance, Stability, and Deep Approximators, *Annual Re-views in Control*, 2018, Vol. 46, pp. 8-28.
13. Xiaozhu L., Xiaopei L., Yang W. Learning Agile Swimming: An End-to-End Approach without CPGs, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025, pp. 1-8.
14. Jingdong L., Lynne E., Raj M. Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Fish, *Studies in Computational Intelligence*, 2007, Vol. 50, pp. 121-135.
15. Goryunov V.V., Polovko S.A., Shchur N.A. Tekhnologiya sozdaniya kiberneticheskikh modeley dlya sinteza i otrabotki regulyatorov sistemy upravleniya dvizheniem avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Technology of creating cybernetic models for the synthesis and testing of controllers for the motion control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 308-318.
16. Yurevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. Leningrad: Energiya, 1975, 413 p.
17. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems. 1st ed. New York: Wiley-Interscience, 1972, 608 p.
18. Reshmi K.R., Priya P.S. Design and Control of Autonomous Unerwater Vehicle for Depth Control Using LQR Controller, *International Journal of Science and Research*, 2016, Vol. 5, Iss. 7, pp. 1432-1436.
19. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation, *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, Vol. 2008, pp. e685175.
20. Avriel M. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Nonlinear Programming. Eaglewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 2003, 548 p.

**Смирнова Екатерина Юрьевна** – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: eus@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89214401814; зам. руководителя научно-исследовательского центра.

**Серов Данила Константинович** – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: d.serov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89110804189; аспирант; инженер 911 лаборатории «Численного моделирования».

**Пельменев Денис Кириллович** – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: d.pelmenev@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89084423980; техник 1 категории 911 лаборатории «Численного моделирования».

**Коренко Никита Павлович** – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: n.korenko@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89215922140; инженер 911 лаборатории «Численного моделирования».

**Никулина Анастасия Юрьевна** – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.nikulina@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89112294800; техник первой категории 931 СКТБ.

**Smirnova Ekaterina Yurievna** – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: eus@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79214401814; deputy head of the Research Center.

**Serov Danila Konstantinovich** – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.serov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79110804189; postgraduate student; engineer of 911 laboratory of “Digital simulation”.

**Pelmenev Denis Kirillovich** – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.pelmenev@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79084423980; technician of the 1st category of 911 laboratory of “Digital simulation”.

**Korenko Nikita Pavlovich** – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: n.korenko@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79215922140; engineer of 911 laboratory of “Digital simulation”.

**Nikulina Anastasiya Yurievna** – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.nikulina@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79112294800; technician of the 1st category of 931 SDB.

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-129-140

**С.М. Соколов, А.А. Богуславский**

## **МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПОВЫШЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Тенденции развития современной робототехники и потребности практики требуют повышения степени автономности робототехнических комплексов. Повышение степени автономности, в свою очередь, требует увеличения ситуационной осведомлённости и, как следствие, увеличение объёма данных и эффективности их обработки в масштабе реального времени на бортовых ресурсах. При этом сохраняется требование экономической целесообразности предлагаемых решений. С учётом того, что в отечественной практике в большинстве случаев используются телеуправляемые роботы, возникает необходимость наращивания их автономности, с использованием уже имеющихся технических решений. Такое направление развития робототехнических комплексов называется переходом от телеуправления к супервизорному управлению. На этом пути осуществляется передача всё большего количества информационно-управляющих функций от оператора к бортовой информационно-управляющей системе. На основе анализа мирового и собственного опыта разработок робототехнических комплексов, авторской методики создания роботов с повышенной степенью автономности, нами выделен ключевой элемент обеспечения интеллектуальной автономности мобильных средств. Предложен унифицированный программно-аппаратный модуль информационного обеспечения мобильных роботов. Основу модуля образует система технического зрения с открытой программно-аппаратной архитектурой. Этот модуль позволяет наращивать степень автономности наземных робототехнических комплексов в части интеллектуальной автономности постепенно, оставаясь в рамках экономической целесообразности. Открытая программная архитектура модуля учитывает имеющееся де-факто разнообразие аппаратных решений в существующих телеуправляемых подвижных средствах и позволяет производить увеличение степени автономности – переходить от режима телеуправления к супервизорному управлению пошагово, сообразно решаемым задачам и доступным средствам. Предлагается методика создания новых или реинжиниринга уже существующих образцов РТК. Методика включает анализ общей компоновки РТК с акцентом на программно-алгоритмическую часть бортовой информационно-управляющей системы. При этом учитываются условия согласования требований к сенсорной и вычислительной частям. В работе рассмотрены примеры применения этой методики к усовершенствованию уже существующих образцов наземных РТК. Приводятся постановки практических задач и примеры их решения с помощью предлагаемого модуля.*

*Автономность роботов; степень автономности; информационное обеспечение; система технического зрения; интеллектуальная автономность; унификация решений в области автономии.*