

# УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАТЕРНИОНОВ

**Е.А. Гаврилина**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

E-mail: [elyamina@bmstu.ru](mailto:elyamina@bmstu.ru)

**Ключевые слова:** управление ориентацией, необитаемый подводный аппарат, дифферент, крен, кватернион.

**Аннотация:** Традиционно необитаемые подводные аппараты эксплуатируют при малых углах наклона (дифферента и крена). Однако появляются задачи, требующие их работоспособности при больших углах наклона. При этом на данный момент, отсутствуют методики построения систем управления таких подводных аппаратов, а также исследования применимости традиционных подходов к решению задачи управления ориентацией при больших углах наклона. В работе рассматривается управление ориентацией необитаемого подводного аппарата при больших углах наклона с использованием кватернионов, приведены результаты, полученные в ходе натурных испытаний на подводном аппарате «Износ», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## 1. Введение

В настоящее время необитаемые подводные аппараты (НПА) активно используются для проведения военных, инженерных и исследовательских подводных работ. Традиционно НПА эксплуатируются при близких к нулю значениях углов наклона (дифферента и крена) и не имеют жестких требований к системе управления (СУ) при больших углах наклона [1]. Однако существуют задачи, для которых требуется работоспособность НПА во всем диапазоне углов ориентации. К таким задачам относятся: осмотр и идентификация миноподобных объектов, маневрирование и осмотр в условиях ограниченного пространства, обследование тоннелей системы охлаждения ядерных реакторов, осмотр корпусов судов, гребных винтов, надводных конструкций и т.п.

Несмотря на актуальность режимов движения НПА при больших углах дифферента и крена и существование аппаратов, которые их поддерживают (SEA WASP, Double Eagle, Subrov, Sabertooth и Sea Owl, V8 SII, MARES [2]), методики построения СУ НПА, работоспособных во всем диапазоне углов ориентации отсутствуют.

При этом традиционные подходы к построению СУ ориентацией НПА предполагают использование углов Эйлера-Крылова (курса, дифферента и крена) и исследованы для режимов движения при малых углах наклона, при этом они имеют ряд особенностей и ограничений при работе на больших углах:

- вырождение кинематических уравнений при угле дифферента  $\pm 90^\circ$  [3];
- неоднозначность определения углов ориентации при угле дифферента  $\pm 90^\circ$  [3];

- увеличение взаимовлияния между каналами управления курсом, дифферентом и креном с ростом углов наклона и, как следствие, ухудшение процессов в СУ [4];
- изменение параметров сепаратных каналов управления курсом, дифферентом и креном с ростом углов дифферента и крена, что приводит к ухудшению процессов в СУ и ограничению допустимых углов наклона, при которых СУ работоспособна.

В тоже время вопрос управления твердым телом во всем диапазоне углов ориентации достаточно проработан для космических, летательных аппаратов и торпед. Анализируя существующие подходы к управлению ориентацией таких объектов, можно выделить подход к управлению ориентацией с использованием кватернионов [3, 5].

Цель работы – исследование закона управления ориентацией НПА с использованием кватернионов и его сравнение с работой традиционных подходов для режимов движения при больших углах наклона.

## 2. Математическая модель

Математическая модель НПА как объекта управления включает в себя описание кинематики и динамики, а также модель движительной системы.

Пространственное движение НПА рассматриваем как суперпозицию поступательного движения его полюса и вращательного движения вокруг полюса. В рамках данной работы рассматривается только вращательное движение НПА, которое задается тремя последовательными поворотами системы координат  $Oxuz$ , связанной с НПА, на углы  $\psi$  курса,  $\vartheta$  дифферента и  $\gamma$  крена относительно базовой системы координат  $Ox_gy_gz_g$  полусвязанной с НПА. Система координат  $Ox_gy_gz_g$  задана следующим образом: вершина  $O$  совмещена с центром масс НПА (полюсом), ось  $Ox_g$  направлена на Север по касательной к меридиану,  $Oz_g$  – по касательной к параллели на Восток, ось  $Oy_g$  – вдоль вертикали места вверх. Полюс связанной с НПА системы координат  $Oxuz$ , также как и  $Ox_gy_gz_g$ , совпадает с центром масс НПА, ось  $Ox$  направлена вдоль продольной оси в носовую часть аппарата, ось  $Oy$  лежит в диаметральной плоскости НПА и направлена вверх, ось  $Oz$  направлена на правый борт.

Кинематические уравнения, используемые для моделирования и анализа подхода к управлению ориентацией НПА в кватернионах, имеют вид:

$$(1) \quad \dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \Omega,$$

где  $\Lambda$  – нормированный кватернион, задающий текущее положение СК  $Oxuz$  относительно полусвязанной СК  $Ox_gy_gz_g$ , компонентами которого являются параметры Родрига-Гамильтона:

$$(2) \quad \Lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T = \left[ \cos \frac{\chi}{2} \cos \bar{\alpha} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\beta} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\gamma} \sin \frac{\chi}{2} \right]^T,$$

где  $\chi$  – угол поворота вокруг оси конечного поворота, а  $\cos \bar{\alpha}$ ,  $\cos \bar{\beta}$ ,  $\cos \bar{\gamma}$  – направляющие косинусы между этой осью и осями  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  соответственно;  $\Omega$  – кватернионное представление угловой скорости НПА:

$$(3) \quad \Omega = [0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T.$$

В начальный момент времени интегрирования компоненты кватерниона рассчитываются из начальных значений углов курса, дифферента и крена в соответствии со следующими уравнениями:

$$(4) \quad \begin{aligned} \lambda_0 &= \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_1 &= \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_2 &= \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2}, \\ \lambda_3 &= \cos \frac{\gamma}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\psi}{2}. \end{aligned}$$

Для моделирования динамики движения НПА рассмотрим упрощенную математическую модель движения, которая рассматривается в работах [1], [6], удобна для анализа, но при этом адекватно отражает процессы, происходящие в системе, и описывается следующими уравнениями:

$$(5) \quad \begin{aligned} (J_x + \lambda_{44})\dot{\omega}_x &= M_{двх} + M_{ax} + M_{гх} + M_{вх}, \\ (J_y + \lambda_{55})\dot{\omega}_y &= M_{дву} + M_{ay} + M_{гy} + M_{вы}, \\ (J_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z &= M_{двz} + M_{az} + M_{гz} + M_{вz} \end{aligned}$$

где  $J_x, J_y, J_z$  и  $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$  – моменты инерции и присоединенные моменты инерции НПА относительно осей ОХ, ОУ, ОZ соответственно;  $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  – угловые ускорения НПА относительно осей ОХ, ОУ, ОZ соответственно;  $M_{двх}, M_{дву}, M_{двz}, M_{ax}, M_{ay}, M_{az}, M_{вх}, M_{вы}, M_{вz}$  и  $M_{гх}, M_{гy}, M_{гz}$  – моменты от силы тяги движителей, силы Архимеда, возмущающих сил и гидродинамических сил сопротивления относительно осей, связанной с НПА системы координат ОХ, ОУ, ОZ соответственно.

Ввиду того, что одним из требований к НПА, управляемым при больших углах наклона является уменьшение статической остойчивости, то для упрощения примем, что метацентрическая высота аппарата равна нулю, а значит моменты от силы Архимеда отсутствуют и  $M_{ax} = M_{ay} = M_{az} = 0$ . Моменты  $M_{гх}, M_{гy}, M_{гz}$  от гидродинамических сил сопротивления используя результаты работы [6] представим в виде:

$$(6) \quad M_{ги} = -C_{\omega i1} \cdot \omega_i |\omega_i| - C_{\omega i2} \cdot \omega_i, \text{ для } i = x, y, z$$

где  $C_{\omega i1}, C_{\omega i2}$  – приведенные гидродинамические коэффициенты. После линеаризации (5) получим следующие уравнения системы:

$$(7) \quad T_{ПАi} \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i = M_{двi}, \text{ где } i = x, y, z, j = 4, 5, 6,$$

$$T_{ПАi} = \frac{J_i + \lambda_{jj}}{2C_{\omega i1}\omega_i^* + C_{\omega i2}}, K_{ПАi} = \frac{1}{2C_{\omega i1}\omega_i^* + C_{\omega i2}}, \omega_i^* - \text{параметр линеаризации.}$$

Модель движителя рассматривается для случая, когда НПА находится в швартовном режиме. В соответствии с работами [1, 6] динамику движителя в таком режиме работы можно описать апериодическим звеном первого порядка:

$$(8) \quad W_{двi} = \frac{F_{двi}(p)}{U_i(p)} = \frac{K_{двi}}{T_{двi}p + 1},$$

где  $T_{двi}, K_{двi}$  – постоянная времени и коэффициент усиления движителей, управляющих движением по  $i$ -му каналу соответственно,  $U_i$  – напряжение, поданное на движители,  $F_{двi}$  – упор, создаваемый  $i$ -м движителем.

### 3. Управление ориентацией с использованием кватернионов

#### 3.1. Закон управления

Подход управления ориентацией в кватернионах заключается в том, что управление положением тела осуществляется поворотом вокруг некоторой мгновенной оси по-

ворота  $\vec{\xi}$  на заданный угол  $\chi$ . При этом задача СУ – совместить вектор угловой скорости НПА  $\vec{\omega}$  с заданной осью  $\vec{\xi}$  и повернуть аппарат вокруг этой оси на заданный угол  $\chi$ .

Текущая заданная ось поворота  $\vec{\xi}$  и угол  $\chi$  формируются с помощью управляющего кватерниона, который вычисляется следующим образом:

$$(9) \quad M = [\mu_0 \mu_1 \mu_2 \mu_3]^T = \widetilde{\Lambda}^{\text{зад}} \circ \Lambda^{\text{тек}},$$

где  $\Lambda^{\text{зад}}$  – заданный кватернион поворота, который вычисляется аналогично уравнению (2), где вместо текущих углов используются заданные углы курса, дифферента и крена, а  $\Lambda^{\text{тек}}$  получен интегрированием кинематического уравнения (1).

Сигналы на движительно-рулевой комплекс НПА имеют вид:

$$(10) \quad U_i = -\text{sign}(\mu_0)K_i\mu_j + \int K_{\text{int } i}\mu_j dt - K_{\text{ди}} \omega_i, \text{ где } i = x, y, z, \text{ а } j = 1, 2, 3.$$

где  $K_x, K_y, K_z, K_{\text{int } x}, K_{\text{int } y}, K_{\text{int } z}, K_{\text{дх}}, K_{\text{дy}}, K_{\text{дz}}$  – коэффициенты СУ, выбранные исходя из требований устойчивости и качества сепаратных каналов управления креном, курсом и дифферентом соответственно.

### 3.2. Результаты экспериментов

Алгоритм управления ориентацией НПА был проверены в ходе натуральных испытаний НПА «Износ», разработанного в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. НПА «Износ» предназначен для дефектоскопии корпусов судов и подводных объектов и имеет гибридный движительный комплекс [7]. Внешний вид НПА представлен на рис. 1 (а). Движительный комплекс включает в свой состав 8 винтомоторных агрегатов (ВМА) и шасси с колесами. ВМА используются для управления НПА в воде, а также позволяют «прижать» НПА к рабочей поверхности. Дальнейшее управление движением НПА по поверхности осуществляется с помощью колес. В процессе стыковки НПА должен принимать положение с большими углами крена и дифферента, на рис. 1 (б) приведена поясняющая иллюстрация.

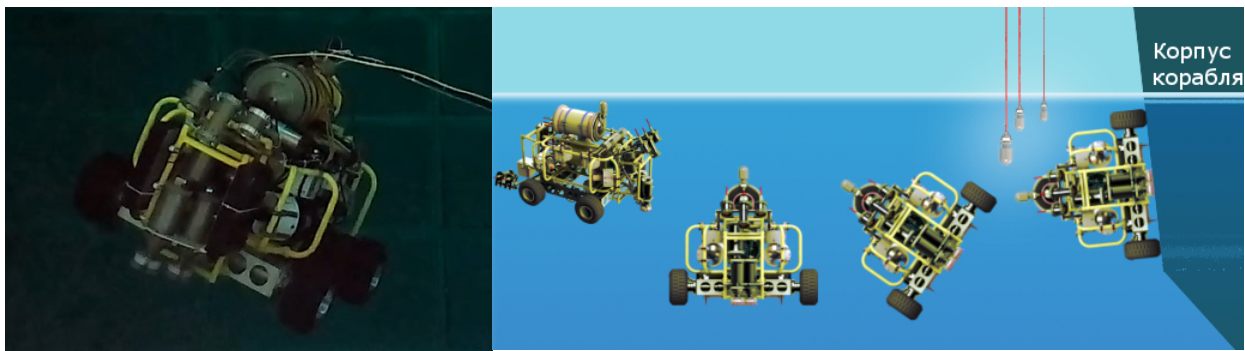


Рис. 1. НПА «Износ» в ходе испытаний в бассейне (а), схема выполнения стыковки с корпусом судна (б).

Исследование работы СУ проводилось следующим образом. На начальном этапе проводилась настройка СУ сепаратными каналами управления курсом, дифферентом и креном. Параметры регулятора были подобраны таким образом, чтобы перерегулирование в каналах управления курсом, дифферентом и креном не превышало 5% как для малых, так и для больших задающих значений.

На следующем этапе проводилось исследование совместной работы каналов управления ориентацией при различных углах крена и дифферента. СУ задавалось значение дифферента более  $45^\circ$ , по завершении переходного процесса, в контуре дифферента происходило управление НПА по курсу или крену. Аналогично совместная работа контуров проверялась при заданных углах крена и дифферента порядка  $45^\circ$ .

Процесс настройки и проверки совместной работы контуров на НПА «Износ» был проверен для традиционных подходов к управлению ориентацией, приведенных в работах [4], [8] и для подхода с использованием кватернионов. Вид переходных процессов в СУ с кватернионами приведен на рис. 2. Параметры переходных процессов для различных подходов приведены в таблице 1.

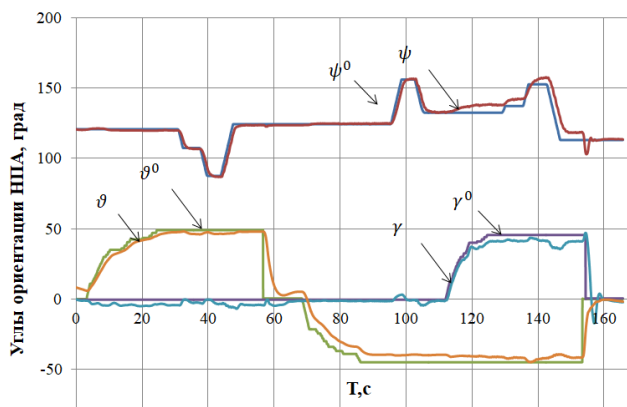


Рис. 2. Результаты натурных испытаний СУ ориентации в кватернионах на НПА «Износ».

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики переходных процессов СУ ориентацией НПА для различных структур и режимов работы.

Подход	$t_{п.п.\psi}$ , с	$t_{п.п.\theta}$ , с	$t_{п.п.\gamma}$ , с	$\sigma_{i\psi}$ , %	$\sigma_{i\theta}$ , %	$\sigma_{i\gamma}$ , %	$\Delta_{дин\theta}$ , °	$\Delta_{дин\gamma}$ , °
<b>Традиционный в углах Эйлера-Крылова</b>	9	9	18	5	0	20	8	45
<b>Традиционный подход с компенсацией [4]</b>	10	8	6	-	5	14	1	20
<b>С использованием кватернионов</b>	5	8	8	2	-	-	4	9

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что подход с использованием кватернионов имеет большее быстродействие и меньшее взаимовлияние между каналами. Кроме того, для данного подхода отсутствует проблема вырождения кинематических уравнений, и неоднозначности определения ориентации НПА при каких-либо углах ориентации по сравнению с традиционными подходами.

## Список литературы

1. Костенко В.В., Михайлов Д. Н. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300» // Подводные роботы ... .2012. Т. 1, № 423. С. 36-46.
2. Ferreira V.M., Jouffroy J. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down // Proceedings of OCEANS 2012 MTS/IEEE, Hampton Roads, USA, 2012. С. 1-7.
3. Бранец В.Н. Шмыглевский И.П. Механика космического полета. М.: Наука, 1973. 320 с.
4. Лямина Е.А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона // Инженерный журнал: наука и инновации, 2018. Вып. 3.
5. Грумондз В.Т., Половинкин В.В. Теория движения двусредных аппаратов. Математические модели и методы исследования. М.: Вузовская книга, 2012. 644 с.
6. Егоров С.А. Управление движением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 361 с.

7. Гамазов Н.И., Гладкова О.И., Егоров С.А. Особенности построения и экспериментальная отработка информационно-управляющей системы гибридного телеуправляемого подводного аппарата // Материалы 6-й всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6). Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 401-405.
8. Лямина Е.А. Подходы к построению системы управления угловым положением необитаемого подводного аппарата без ограничений на углы наклона // Труды Крыловского государственного научного центра, 2018. Специальный выпуск 1. С. 224-234.