

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-31-33

*В. В. Жога, Н. Г. Шаронов, И. П. Вершинина***ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО РОБОТА
С МАНИПУЛЯТОРАМИ*****Волгоградский государственный технический университет**
viczhoga@gmail.com

Моделируется движение необитаемого подводного аппарата (НПА) с манипуляторами, закрепленными на его корпусе. Предлагаемая математическая модель предназначена для синтеза алгоритмов системы управления технологическими операциями в режиме динамического позиционирования и отслеживания программных траекторий рабочего органа.

Ключевые слова: манипулятор, квазикоординаты, уравнения Эйлера – Лагранжа, динамическое позиционирование, программные траектории.

*V. V. Zhoga, N. G. Sharonov, I. P. Vershinina***DYNAMIC MOTION MODEL OF AN UNDERWATER ROBOT
WITH MANIPULATORS****Volgograd State Technical University**

The motion of an uninhabited underwater vehicle (NPA) with manipulators mounted on its body is simulated. The proposed mathematical model is designed to synthesize algorithms for the control system of technological operations in the mode of dynamic positioning and tracking of program trajectories of the working body.

Keywords: manipulator, quasi-coordinates, equations Euler – Lagrange, dynamic positioning, program trajectories.

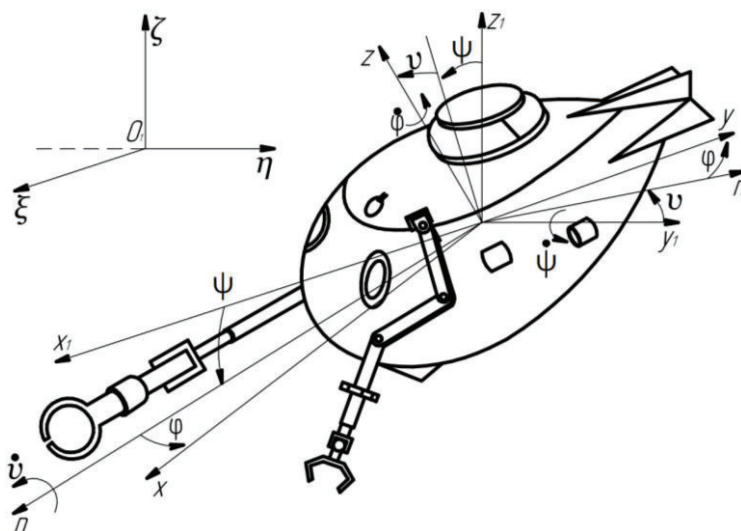
Введение

Для выполнения технологических операций на подводные роботы устанавливаются многозвенные манипуляторы [1, 2]. С их помощью решаются задачи мониторинга морского дна, взятие биологических проб и обслуживание подводных сооружений, включая трубопроводы. Также подводные роботы широко используются при проведении поисково-спасательных работ, при изучении подводной флоры и фауны, для инспекции судов и в других случаях

[3, 4]. Применение подводных манипуляторов избавляет человека от опасного труда и, в то же время, сокращает эксплуатационные расходы, делая возможным проведение широкого спектра операций, недоступных человеку.

Расчетная схема

Механическая часть НПА представляется в виде твердого тела (корпуса) и связанных с ним многозвенных механизмов манипуляционных роботов (см. рисунок ниже).



Расчетная схема необитаемого подводного аппарата

© Жога В. В., Шаронов Н. Г., Вершинина И. П., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01589, <https://rscf.ru/project/22-29-01589/>.

Движение корпуса НПА рассматривается относительно неподвижной системы отсчета $O_1\xi\eta\zeta$ и определяется вектором скорости $\vec{V}_0$ центра масс корпуса и вектором его угловой скорости $\vec{\omega}$. С корпусом аппарата жестко связана система координат $Oxyz$, оси которой являются главными центральными осями инерции. Конфигурация манипуляторов относительно этой системы координат описывается обобщенными координатами q_{si} ($i=1,2,\dots,k$ – количество манипуляторов; $s=1,2,\dots,n_k$ – число степеней свободы k -го манипулятора). Положение системы координат $Oxyz$ задается с помощью корабельных углов Эйлера $\psi(t), \varphi(t), \nu(t)$ относительно системы координат

$Ox_1y_1z_1$, перемещающейся поступательно относительно неподвижной системы $O_1\xi\eta\zeta$. С каждым звеном манипуляторов связаны подвижные системы координат $C_{si}x_{si}y_{si}z_{si}$, оси которых являются главными центральными осями инерции.

Уравнения движения корпуса

Уравнения движения центра масс системы «корпус – манипуляторы» составляется в форме уравнений Эйлера – Лагранжа [5] относительно квазискоростей $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекций векторов $\vec{V}_0, \vec{\omega}$ на оси подвижной системы координат $Oxyz$. В векторной форме эти уравнения имеют вид:

$$M \left[\vec{V}_0^* + \vec{\omega} \times \vec{V}_0 + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_c^* + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_c^*) + 2\vec{\omega} \times \vec{r}_c^{**} + \ddot{\vec{r}}_c^{**} \right] = \vec{N}, \quad (1)$$

$$\|\Theta^o\| \cdot \dot{\vec{\omega}} + \|\Theta^o\| \cdot \vec{\omega} \times \|\Theta^o\| \cdot \vec{\omega} + \vec{K}_r^o + \vec{\omega} \times \vec{K}_r^o + M\vec{r}_c^* \times \left(\vec{V}_0^* + \vec{\omega} \times \vec{V}_0 \right) = \vec{m}^o, \quad (2)$$

где M – масса корпуса и манипуляторов; $\vec{r}_c^*, \vec{r}_c^{**}$ – радиус-вектор центра масс системы относительно полюса O и его относительные производные; $\|\Theta^o\|$ – тензор инерции системы в точке O ; $\vec{K}_r^o$ – главный момент относительных количеств движения относительно полюса O системы; $\vec{N}, \vec{m}^o$ – главный вектор и главный момент всех активных сил относительно полюса O .

Уравнение (1) выражает теорему об изменении главного вектора количества движения системы, а уравнение (2) – теорему об изменении главного вектора момента количеств движения системы. Система уравнений (1), (2) содержит обобщенные координаты манипуляторов q_{si} и соответствующие им обобщенные скорости и обобщенные ускорения. Для полного описания движений механической системы необходимо составить уравнения движения манипуляторов.

Дифференциальные уравнения относительного движения манипуляторов

Кинетическую энергию системы можно представить в виде суммы трех слагаемых:

$$T = T_e + T_m + T_r. \quad (3)$$

В этом выражении T_e – кинетическая энергия переносного движения, равная

$$T_e = \frac{1}{2} \left[M\vec{V}_0^2 + 2M\vec{V}_0 \cdot (\vec{\omega} \times \vec{r}_c^*) + \vec{\omega} \cdot \Theta^o \cdot \vec{\omega} \right]. \quad (4)$$

Величины $\Theta^o(q_{is})$ и $\vec{r}_c^*(q_{is})$ являются функциями обобщенных координат манипуляторов, а от обобщенных скоростей не зависят.

Слагаемые

$$T_m = \vec{V}_0 \cdot \vec{Q}_r + \vec{\omega} \cdot \vec{K}_r^o \quad (5)$$

зависят от относительных движений звеньев манипуляторов и являются линейными функциями обобщенных скоростей $\dot{q}_{is}$.

Кинетическая энергия относительных движений T_r является квадратичной функцией обобщенных скоростей $\dot{q}_{is}$ с коэффициентами, зависящими от обобщенных координат q_{si} :

$$T_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}(q_{ij}) \cdot \dot{q}_i \dot{q}_j. \quad (6)$$

Применяя для (3) формализм Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{si}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_{si}} = Q_{si}^{\Phi} + Q_{si}^{\Psi}, \quad s=1,2,\dots,n \quad (7)$$

с учетом выражений (4), (5) и (6), получаем n дифференциальных уравнений относительных движений механизма манипулятора:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_r}{\partial \dot{q}_{si}} \right) - \frac{\partial T_r}{\partial q_{si}} = Q_{si} + Q_{si}^\Phi - M \left(\vec{V}_0^* + \vec{\omega} \times \vec{V}_0 \right) \cdot \frac{\partial \vec{r}_c'}{\partial q_{si}} + \frac{1}{2} \vec{\omega} \cdot \frac{\partial \Theta^o}{\partial q_{si}} \cdot \vec{\omega} - \dot{\vec{\omega}} \cdot \frac{\partial \vec{K}_r^o}{\partial \dot{q}_{si}} - \vec{\omega} \cdot \left[\left(\frac{\partial \vec{K}_r^o}{\partial \dot{q}_{si}} \right) - \frac{\partial \vec{K}_r^o}{\partial q_{si}} \right], \quad (8)$$

где Q_{si} – обобщенная сила активных сил, соответствующая s координате; Q_{si}^Φ – обобщенная сила сил сопротивления.

Обобщенные силы сил сопротивления в случае линейного вязкого сопротивления вычисляются через диссипативную функцию Рэлея, которая может быть записана в форме

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mu_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j.$$

Конкретный вид левой части уравнений (8) зависит от кинематических схем манипуляторов, установленных на НПА.

Таким образом, сформирована система из $(6 + \sum n_k)$ дифференциальных уравнений относительно шести квазикоординат V_x, V_y, V_z ,

$$\omega_x, \omega_y, \omega_z \text{ и } \sum_{s=1}^{n_k} \sum_{i=1}^k q_{si} - \text{обобщенных координат}$$

присоединенных манипуляторов.

Полученная система дифференциальных уравнений (1), (2), (8) позволяет решать задачу синтеза алгоритма стабилизации рабочего ор-

гана манипулятора относительно назначенного положения на основе решения обратной задачи динамики. Параметры системы управления манипуляторами и корпусом НПА определяются по уравнениям математической модели в режиме динамического позиционирования [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бахареv, С. А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения мирового океана / С. А. Бахареv, В. В. Карасев, А. В. Карасев // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. – 2015. – С. 41–51.
2. Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами / А. Ю. Коноплин, А. П. Юрманов, Н. А. Красавин, П. А. Пятавин // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 3 (37). – С. 4–15.
3. Коноплин, А. Ю. Система управления скоростью движения манипуляторов, установленных на необитаемых подводных аппаратах / А. Ю. Коноплин, Н. А. Красавин // Подводные исследования и робототехника. – 2022. – № 2(40). – С. 29–38.
4. Филаретов, В. Ф. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. Ю. Коноплин, Н. Ю. Коноплин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 8. – С. 543–549.
5. Лурье, А. И. Аналитическая механика. / А. И. Лурье. – М.: Наука, Физматлит., 1961. – 824 с.
6. Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода / Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов, В. В. Жога, И. А. Несмиянов // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 3 (52). – С. 46–55.