И. С. Пеньшин

**О ЗАКОНАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ НАТЯЖЕНИЯ ТРОСОВ
В ЯКОРНО-ТРОСОВЫХ ДВИЖИТЕЛЯХ ПОДВОДНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ***

Волгоградский государственный технический университет
Darklight983@gmail.com

Рассматриваются возможности синтеза различных законов распределения силы натяжения тросов в модулях якорно-тросового движителя. Проведен анализ особенностей нескольких вариантов распределения сил натяжения.

Ключевые слова: подводная платформа, положительная плавучесть, якорно-тросовый движитель, подводный мобильный робот.

I. S. Penshin

**ABOUT THE LAWS OF THE DISTRIBUTION OF THE TENSIONING FORCES
OF THE CABLES IN UNDERWATER ANCHOR-CABLE MOBILE ROBOTS**

Volgograd State Technical University

Possibilities of synthesis of various laws of distribution of the tension force of cables in the modules of the anchor-cable mover are considered. The analysis of the features of several variants of the distribution of tensile forces is carried out.

Keywords: underwater platform, positive buoyancy, anchor-rope propulsion device, underwater mobile robot.

Введение

Среди движителей, применяемых для наземных транспортных средств и роботов, наиболее широкое распространение получили колесный и гусеничный движители. Однако для освоения океанического дна к перспективным движите-

лям относится и шагающий в различном конструктивном исполнении. Среди них конструктивной простотой и несложной системой управления обладают якорно-тросовые движители, установленные на роботе-понтоне с небольшой положительной плавучестью (рис. 1) [1, 2].

Рис. 1. Общий вид и устройство платформы с якорно-тросовым движителем:
1 – якорь (стопа); 2 – тросы; 3 – маховик; 4 – корпус с системой управления и системой машинного зрения

Описание работы

Движителем является якорь, двумя тросами 2 и 3 связанный с вращающимися в соответствии с определенными законами барабанами (рис. 2). Под якорем понимается массивное тело произвольной формы, находящееся на дне. Якорь 1 зацепляется с землей 7 и соединяется с тягловым тросом 2 и несущим тросом 3, которые соединены с маховиками 4. В начале дви-

жения тягловый трос 2 тянет за собой весь робот к якорю 1, пока трос 2 не займет вертикальное положение. После этого трос 2 начинает поднимать якорь 1 и в определенный момент включается маховик с тросом 3, который переводит якорь 1 в исходное положение, описывая траекторию 6. Таким образом, циклически происходит движение якорно-канатной движителя.

Рис. 2. Кинематическая схема движения якорно-тросового движителя:
1 – якорь; 2 – тянущий трос; 3 – переносящий трос; 4 – маховик; 5 – груз

Постановка задачи

Ставится задача нахождения законов управления приводами движителей, необходимых моментов сил, развиваемых приводными двигателями, а также определения их мощности при поступательном горизонтальном движении подводной платформы (корпуса робота).

Методы решения

Для решения поставленной задачи рассматривается поступательное равномерное движение твердого тела в вязкой среде с избыточным количеством нестационарных связей при условии равновесия твердых тел (якорей), взаимодействующих с нелинейной упругодиссипативной средой (придонный грунт), моделируемой как твердое шероховатое тело с горизонтальной ровной поверхностью. Нестационарными связями являются тросы, длины которых изменяются в соответствии с уравнениями программного движения робота, определяемые положением якоря и местом расположения управляемых барабанов.

При использовании силомоментного очувствления движителей управление движением

строится на основе информации об усилиях [3, 4, 5, 6].

Расчетная схема представлена на рис. 3.

Уравнения поступательного равномерного движения платформы можно записать в виде:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_c = \sum_{j=1}^n T_{1j} \cos \alpha_{1j} + \sum_{j=1}^n T_{2j} \cos \alpha_{2j} - Q \\ M\ddot{y}_c = -G - \sum_{j=1}^n T_{1j} \sin \alpha_{1j} - \sum_{j=1}^n T_{2j} \sin \alpha_{2j} + \Phi \\ I\ddot{y} = \Phi b - \sum_{j=1}^n T_{1j} \sin \alpha_{1j} (a_j - l) - \sum_{j=1}^n T_{2j} \sin \alpha_{2j} a_j \end{cases}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – силы натяжения тросов в тянущем и переносящем режиме якорно-тросового движителя; $M\ddot{x}_c$, $M\ddot{y}_c$ – моменты относительно осей x и y ; $I\ddot{y}$ – момент инерции относительно оси y .

Цикл одного модуля якорно-тросового движителя состоит из двух фаз:

- фаза взаимодействия с грунтом;
- фаза переноса в новое положение.

Рис. 3. Расчетная схема n двигателей на платформе:

A_j – расстояние от центра масс до тянущего маховика; l – межосевое расстояние между двумя маховиками j -го двигателя; G – сила тяги; Φ – выталкивающая сила; Q – сила сопротивления движению; α_{1j} , α_{2j} – углы отклонения тросов от горизонтальной оси; l_1 , l_2 – длины тросов j -го двигателя; mg – вес якоря; $\zeta.м.$ – центр масс; $\zeta.п.$ – центр плавучести; b – расстояние между центром масс и центром плавучести; h – расстояние от продольной оси до дна

При таком разделении считается, что в фазе опоры тяговое усилие развивает только тянущий трос $T_1 \neq 0$, а усилие в другом тросе $T_2 = 0$. В фазе переноса задействованы оба троса, и силы натяжения будут в обоих тросах.

Каждый якорь в каждом модуле двигателя располагается изначально в некотором положении, характеризующемся переменной Δ_{0j} . Таким образом, задается начальное положение якоря $0 < \Delta_{0j} < l$; видно, что Δ_{0j} для каждого j -го двигателя задается в начале цикла движения, а далее положение якоря относительно межосевого расстояния l будет характеризовать величина Δ_j , которая, в свою очередь, определяется из условия:

$$\Delta_j = \begin{cases} \Delta_{0j} + v_0 t \\ 0 \\ v_0(t - \tau) + (\Delta_{0j} - l) \end{cases}$$

$$0 < t \leq \frac{l - \Delta_{0j}}{v_0},$$

$$\frac{l - \Delta_{0j}}{v_0} < t \leq \frac{l - \Delta_{0j}}{v_0} + \tau,$$

$$\frac{l - \Delta_{0j}}{v_0} + \tau < t \leq \tau_0.$$

(2)

В фазе переноса силы натяжения T_j рассчитываются по системе уравнений, где в расчет

берутся силы натяжения для тянущего и переносящего привода.

$$\begin{cases} T_{1j} \sin \alpha_{1j} + T_{2j} \sin \alpha_{2j} = m\ddot{x}_j \\ T_{1j} \cos \alpha_{1j} + T_{2j} \cos \alpha_{2j} = m\ddot{y}_j \end{cases}, \quad (3)$$

где m – масса якоря; x_j , y_j – координаты переносимого якоря, а значения синусов и косинусов определяются по следующим формулам:

$$\cos \alpha_{1j} = \frac{l - \Delta_j}{l_1}; \quad \cos \alpha_{2j} = -\frac{\Delta_j}{l_2};$$

$$\sin \alpha_{1j} = \frac{H}{l_1}; \quad \sin \alpha_{2j} = \frac{H}{l_2}, \quad (4)$$

где l_1 и l_2 – длины тросов на тянущем и переносящем маховике соответственно. Они определяются по формулам:

$$l_1 = \sqrt{H^2 + (l - \Delta_j)^2}; \quad l_2 = \sqrt{H^2 + \Delta_j^2}. \quad (5)$$

В силу превышения количества N управляемых приводов двигателей над числом считаемых степеней свободы $S = 1$ работа-понтон, совершающего поступательное движение, с прямолинейным вдоль горизонтальной оси перемещением его центра масс, вводятся динамические уравнения, устанавливающие связь между силами натяжения тросов [7, 8]:

$$T_j = T_0 \xi_j \quad (j = 1 \dots n). \quad (6)$$

Такое распределение обеспечивается системой управления движением. Таким образом, при изучении поступательного движения робо-

та-понтон с постоянной скоростью совместно решается первое уравнение системы (1) при $\ddot{x}_c = 0$ и n уравнений (6) относительно T_j , T_0 .

Решение задачи

Рассмотрим модельную задачу со следующими начальными данными: $n = 5$; $\Phi = 11000$ Н; $G = 10000$ Н; $Q = 1000$ Н; $l = 2$ м; $V = 1$ м/с.

Коэффициенты ξ_j приведены ниже в таблице.

На рис. 4 представлены графики сил натяжения для первого варианта.

Коэффициенты ξ_j

Номер варианта	Номер движителя				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	3	2	1
3	1	1,5	3	1,5	1

Рис. 4. Распределение сил натяжения в тросах при равномерном распределении

Как видно из рис. 4, при равномерном распределении сил натяжения все графики сил натяжения накладываются друг на друга. Таким

образом, очевидно, что для всех модулей нагрузка одинакова и можно использовать универсальные компоненты.

Рис. 5. Распределение сил натяжения в тросах при параболическом распределении

Из рис. 5 следует, что при равенстве коэффициентов распределения соответствующие графики накладываются друг на друга. Это приводит к уменьшению степени взаимозаменяемости компонентов. Однако при таком ва-

рианте получается значительное снижение сил натяжения для крайних модулей, но вместе с этим и значительное увеличение сил натяжения для модулей, располагающихся ближе к центру платформы.

Рис. 6. Распределение сил натяжения в тросах при экспоненциальном распределении

Аналогично с рис. 5, на рис. 6 наблюдается наложение графиков, однако картина распределения отличается от предыдущего варианта. Нагрузка на крайние движители значительно меньше, но пиковая сила натяжения для модуля в центре намного больше, что приводит к еще большему снижению взаимозаменяемости компонентов.

Заключение

В результате проведенного анализа представленных вариантов размещения движителей можно сделать следующие выводы:

- коэффициент расположения значительно влияет на изменение силы натяжения тросов;
- наименьшая сила натяжения получается при использовании варианта 3, однако наиболее стабильным и единообразным является вариант 1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добрецов, В. Б. Освоение минеральных ресурсов шельфа / В. Б. Добрецов. – Л., 1980. – 272 с.
2. Тимофеев, И. П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна / И. П. Тимофеев. – Л.: ЛПИ, 1987. – 176 с.

3. О рациональных режимах движения якорно-тросовых движителей при переносе в новое положение / Е. С. Брискин, В. Н. Платонов, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов, С. А. Устинов // Экстремальная робототехника. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 227–233.

4. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями: моногр. / Е. С. Брискин, В. В. Жога, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов. – М.: Машиностроение, 2006. – 164 с.

5. Градецкий, В. Г. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин, Л. Н. Кравчук. – М.: Наука, 2001. – С. 26–91, 275–294.

6. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов, И. С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.

7. Черноусько, Ф. Л. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник, В. Г. Градецкий // ВСПУ-2014 ИПУ РАН, 2014. – С. 67–78.

8. Брискин, Е. С. Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 48–54.