УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2020-9-244-72-76

В. Н. Платонов

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ТРОСОВЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

В статье рассматривается движение корпуса-платформы подводного мобильного робота с избыточным числом тросовых движителей, цепляющихся за дно водоема. Исследуется задача определения закономерностей переходного процесса, оценки его устойчивости и показателей качества управления при установлении задаваемых соотношений между усилиями в тросах.

Ключевые слова: устойчивость, динамическая система, управление движением, якорно-тросовый движитель.

© Платонов В. Н., 2020

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-38-90265.

V. N. Platonov

ON THE STABILITY OF MOBILE ROBOTS MOVEMENT WITH CABLE PROPULSION DEVICES

Volgograd State Technical University

The movement of the platform of the underwater mobile robot with an excessive number of propulsion devices, clinging to the reservoir's bottom, is considered. The task of determining the laws of the transition process, assessing its stability and quality indicators of control when establishing the specified relations between the efforts in the cables is studied.

Keywords: sustainability, dynamic system, motion control system, anchor-rope propulsion.

Введение

При исследовании движения мобильных подводных роботов, передвигающихся по дну водоема, одной из актуальных задач является изучение поступательного движения такого робота с шагающими движителями [1, 2, 3], в частности, передвижения подводной платформы-понтонa с помощью якорно-тросовых движителей.

Для однозначной реализации движения абсолютно твердого тела необходимо минимум шесть управляющих воздействий, что в рассматриваемой задаче движения роботизированной платформы соответствует шести якорно-тросовым движителям, взаимодействующим с грунтом. В случае отсутствия гарантированного взаимодействия хотя бы одного якоря с грунтом, движение робота становится непредсказуемым, что и приводит к необходимости использования избыточного числа движителей и, как следствие, превышения числа управляющих воздействий над количеством независимых обобщенных координат рассматриваемой механической системы, имеет место динамическая неопределенность.

Задача распределения динамической нагрузки между несколькими исполнительными устройствами по тому или иному критерию является известной [4]. Самым простым примером может служить работа автомобильного дифференциала. Известны системы управления тросовыми роботами несколькими приводами [5].

Постановка задачи

В [6] получены уравнения движения груза под действием двух управляющих воздействий и решения, позволяющие определить эти воздействия (напряжения, подводимые к электроприводам) для реализации задаваемого отношения усилий в тросах движителя $\chi = T_2/T_1 = \text{const}$.

Однако в процессе движения платформы при перестановке якорей возникает необходимость изменения соотношения усилий в тросах движителя χ . Поэтому отношение усилий

$\chi_j = T_j/T_1$ имеет характер зависимости от времени $\chi_j = \chi_j(t)$. Здесь T_j – усилие в j -м тросе; T_1 – усилие в условно «базовом» первом тросе. В те моменты времени, когда первый движитель находится в переносе, в качестве «базового» следует принять любой другой.

Поэтому возникает задача определения закономерностей переходного процесса, оценки его устойчивости и показателей качества управления при установлении задаваемых соотношений χ_j между усилиями в тросах T_j и T_k .

Метод решения

Метод решения поставленной задачи основывается на использовании дифференциальных уравнений поступательного движения робота-понтонa:

$$M\ddot{x} = -Q(\dot{x}) + \sum_{j=1}^{2N} T_j(x) A_j(x), \quad j = 1, 2, \dots, 2N, \quad (1)$$

где N – количество движителей; M – масса робота; $Q(\dot{x})$ – сила сопротивления движению, зависящая от его скорости; $T_j(x)$ – сила натяжения j -го троса; $A_j(x)$ – известные зависимости, зависящие от конструктивных особенностей приводов движителей, связывающие между собой усилия в j -м тросе и тяговую силу, развиваемую j -м приводом; в простейшем случае это косинус угла между силой натяжения T_j и осью OX (горизонтальной осью).

Однако из уравнения (1) при задании программного движения $\dot{x} = V(t)$ невозможно определить усилия T_j , так как в этом случае в одном уравнении (1) содержится $2N$ неизвестных усилий. Для получения однозначного решения, уравнение (1) следует дополнить вспомогательными $2N$ уравнениями, связывающими между собой неизвестные величины усилий в тросах T_j .

Такие уравнения могут иметь вид:

$$\sum T_{kj}(x) B_{kj}(x) = P_k(x), \quad k = 1, 2, \dots, 2N, \quad (2)$$

где $B_{kj}(x)$, $P_k(x)$ – соответственно прямоугольная матрица и матрица-столбец, которые, в общем

случае, подлежат определению из условия экстремума задаваемого критерия качества движения [6, 7]; k – число вспомогательных уравнений.

К уравнениям (1) и (2) следует присоединить уравнения, связывающие между собой углы поворотов всех движителей ψ_j через перемещение робота-понтон x и записать уравнения вращательного движения ротора j -го двигателя постоянного тока в виде:

$$J_j \ddot{\varphi}_j = k_j U_j - \mu_j \dot{\varphi}_j - T_j \frac{R_j}{v}, \quad \varphi_j = v \psi_j(x), \\ j = 1, 2, \dots, 2N, \quad (3)$$

Уравнение в вариациях будут иметь вид:

$$\begin{cases} M \delta \ddot{x} + \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} \delta \dot{x} - \sum_{i=1}^{2N} \frac{T_i}{v} \frac{\partial A}{\partial x} \delta x - \sum_{i=1}^{2N} \frac{A_i}{v}(x) \delta T_i = 0; \\ J_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \delta \dot{x} + \left[2J_j \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} v_0 + \mu \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \right] \delta \dot{x} + \left[J_j \frac{\partial^3 \varphi_j}{\partial x^3} v_0^2 + \mu \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} \right] \delta x + \sum_{j=1}^{2N} \frac{R_j}{v} \delta T_j = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Линеаризованную систему уравнений на промежутке от начала или завершения этапа переноса очередного движителя, характеризуемого координатой x_n , до начала или завершения такого же этапа следующего, характеризуемого координатой x_k , можно представить в форме $(2N+1)$ линейных дифференциальных уравнений в вариациях в форме:

$$a_n \delta \ddot{x} + b_n \delta \dot{x} + c_n \delta x + \sum_{j=1}^{2N} e_{nj} \delta T_j = 0, \\ n = 1 \dots (2N+1). \quad (5)$$

Таким образом, $(2N+1)$ уравнений в вариациях содержат $(2N+1)$ переменных δx и δT_j , $j = 1, 2 \dots 2N$.

Характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (4) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} a_1 \lambda^2 + b_1 \lambda + c_1 & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{12N} \\ a_2 \lambda^2 + b_2 \lambda + c_2 & R_1 & R_2 & \dots & R_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{2N+1} \lambda^2 + b_{2N+1} \lambda + c_N & R_1 & R_2 & \dots & R_{2N} \end{vmatrix} = 0; \quad (6)$$

Модельная задача исследования устойчивости поступательного движения твердого тела при использовании двух двигателей

Задача о прямолинейном, с постоянной скоростью, движении твердого тела под действием

где v – передаточное отношение в приводе от ДПТ к маховику, J_j – приведенный момент инерции привода к оси ротора ДПТ.

Уравнения (1)–(3) описывают установившийся процесс после переноса очередного якорно-тросового движителя в новое положение, и справедливо до начала переноса или установки на грунт следующего движителя. Этот процесс требует исследования на устойчивость.

Для этого составляются уравнения в вариациях исследуемого процесса движения, анализируемого до начала переноса или установки на грунт следующего движителя.

усилий в тросах, развиваемых двумя двигателями, моделирующая перемещение робота-понтон с двумя якорно-тросовыми движителями, рассмотрена в [6], где для заданного соотношения T_2/T_1 . Получены и экспериментально подтверждены зависимости $T_1(t)$, $T_2(t)$. Однако на устойчивость полученное решение не анализировалось.

Для исследования устойчивости решения дифференциальных уравнений (4) необходимо, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения (6) были отрицательными.

Характеристическое уравнение для случая $R_1 = R_2$ и использования одинаковых ДПТ имеет вид:

$$(a_2 - a_3) \lambda^2 + (b_2 - b_3) \lambda + (c_2 - c_3) = 0. \quad (7)$$

В соответствии с критерием Рауса-Гурвица [8], для обеспечения устойчивости требуется, чтобы выполнялись неравенства:

$$B = b_2 - b_3 < 0 \\ C = c_2 - c_3 < 0. \quad (8)$$

Исследование устойчивости движения проводилось на стенде с двумя приводами (для случая $N = 1$), схема которого представлена на рис. 1.

Рис. 1. Расчетная схема исследования режимов движения твердого тела

Для модельной задачи с заданными параметрами (масса твердого тела $M = 0,5$ кг, масса маховиков и их радиусы соответственно $m = 0,24$ кг и $R = 0,015$ м, постоянная электродвигателя $\mu = 0,014$ Нм/с, геометрические размеры $h_1 = h_2 = 0,4$ м и $l_1 = 0,19$ м) и варьируе-

мом параметре l_2 получены зависимости коэффициентов $B = b_2 - b_3$, $C = c_2 - c_3$ при различных соотношениях l_1/l_2 . Изменение значений коэффициентов B и C характеристического уравнения представлено на рис. 2, 3.

Рис. 2. Изменение коэффициента B в зависимости от отношения l_1/l_2

Рис. 3. Изменение коэффициента C в зависимости от отношения l_1/l_2

Выводы

В результате исследования получена зависимость, связывающая входные и выходные параметры по одному из каналов управления – в частности, управления силами натяжения в тросах. На основе установленной зависимости рассчитаны настройки автоматического регулятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серов, В. А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подледных) месторождений полезных ископаемых / В. А. Серов, И. В. Ковшов, С. А. Устинов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 181–191.
2. Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II / Jin-HoKim, Tae-KyeongYeu, Suk-MinYoon, Hyung-WooKim, Jong-SuChoi, Cheon-HongMin and Sup-Hong // Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22–26, 2013. pp. 269–273.
3. Chernyshev, V. V. et al. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 //Proc. of the ASME 2016

35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 / Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OOAE) Division of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Pusan National University. – [Busan], 7, 2016. – 9 p.

4. On Motion Control of Mechanical Systems with an Excessive Number of Control Actions / E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2019. – Vol. 58, Issue 3. – P. 374–381.

5. Фадеев, М. Ю. Управление параллельным четырех-тросовым роботом с помощью обратной кинематической модели / М. Ю. Фадеев, А. В. Малолетов // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2018) : Сборник трудов конференции. – 2019. – С. 696–699.

6. Брискин, Е. С. О математическом моделировании управления движением твердого тела с избыточным числом тросовых движителей / Е. С. Брискин, В. Н. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – № 20 (7). – С. 422–427.

7. On Motion Control of Mechanical Systems with an Excessive Number of Control Actions / E. S. Briskin, N. G. Sharonov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2019. – Vol. 58, Issue 3. – P. 374–381.

8. Routh, E. J. A Treatise on the Stability of Motion, 1877.