УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-26-31

В. В. Гулевский

О КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ЯКОРНО-ТРОСОВО-ГУСЕНИЧНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ*

Волгоградский государственный технический университет
dtm@vstu.ru

Рассмотрен метод расчета мобильных роботов с якорно-тросово-гусеничными движителями. Рассмотрено влияние массово-геометрических характеристик мобильного робота на устойчивость его движения в квазистатических режимах перемещения по дну водоема.

Ключевые слова: подводная платформа, якорно-тросово-гусеничный движитель.

V. V. Gulevskiy

ON QUASI-STATIC MODES OF MOTION OF UNDERWATER MOBILE ROBOTS WITH ANCHOR-ROPE-TRACK DRIVES

Volgograd State Technical University

A method for calculating mobile robots with anchor-cable-tracked drives is considered. The influence of the mass-geometric characteristics of a mobile robot on the stability of its movement in quasi-static modes of movement along the bottom of a reservoir is considered.

Keywords: underwater platform, anchor-cable-tracked drives.

Введение

Среди движителей мобильных роботов, перемещающихся по дну водоема, обычно рассматриваются колесные, гусеничные и шагающие движители [1–9]. Каждый из движителей имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее простыми по конструкции и системе управления являются колесные и гусеничные движители, а обладающими наиболее высокой профильной и грунтовой проходимостью – шагающие [10–13]. Однако и для шагающих движителей имеются ограничения в профильной проходимости, обусловленные высотой подъема стопы движителя [14]. Вместе с тем для подводных роботов возможно наличие управляемой выталкивающей силы, которую можно целенаправленно использовать для улучшения проходимости за счет снижения нормальной реакции на грунт стопы движителя в фазе его взаимодействия с опорной поверхностью. Это может достигаться, например, за счет применения тросов, установленных между тяжелой стопой движителя – якорем и корпусом робота, имеющего небольшую положительную плавучесть. Но тогда требуется достаточно эффективная система управления натяжением тросов, обеспечивающая необходимое программное движение [15] как в целом робота, так и его движителей.

Упрощение системы управления длиной и натяжением тросов может достигаться применением общего механизма перемещения точек подвеса тросов (например, гусеничной це-

пи). В целом такие движители можно определить как якорно-тросово-гусеничные [16].

Их преимущества перед якорно-тросовыми движителями состоят в минимальном количестве приводных движителей, а перед колесными, гусеничными – в практически идеальной профильной проходимости.

Описание конструктивной схемы и принципа работы движителя

Общий вид якорно-гусенично-тросового движителя представлен на рис. 1.

Рис. 1. Якорно-гусенично-тросовый движитель

© В. В. Гулевский, 2021.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-38-90283, № 19-48-340018.

Двигатель для мобильной платформы 1 состоит из рамы 2 с попарно установленными на ней механизмами продольного перемещения 3, посредством которых рама 2 крепится к мобильной платформе 1. Механизмы продольного перемещения 3 соединены с платформой 1 и рамой 2 посредством шарниров, с возможностью фиксации заданного положения. Равномерно по периметру рамы 2 расположены ролики 4, на которых установлен гибкий цепной транспортер 5. Один из роликов 4 соединен с валом двигателя (не показан) и является ведущим, образуя с цепным транспортером 5 цепную передачу. Вращение ведущих роликов обеспечивается за счет двигателя. На транспортере 5 на тросах 6 равномерно по всей длине транспортера подвешены якоря 7. Перемещение происходит следующим образом: с помощью механизмов продольного перемещения 3, обеспечивая различную длину выдвижения их штоков, рама 2 занимает положение с углом α относительно плоскости дна. Поворот на заданный угол относительно горизонта обеспечивает различный клиренс между дном водоема и рамой. Транспортер 5 вращается по направлению движения платформы 1; якоря 7, находящиеся на звеньях транспортера 5, расположенных ближе ко дну, опущены на дно; длина тросов 6 фиксирована и остается неизменной, за счет этого вторая часть якорей 7, находящихся на звеньях транспортера 5, дальше от дна, его не касается. За счет пе-

ремотки транспортера 5 якоря 7, находящиеся на разных звеньях транспортера, постепенно меняются своим положением, подтягивая платформу 1 в сторону движения.

Расчетная схема робота-понтон с якорно-тросово-гусеничными двигателями в состоянии квазистатического режима движения

Расчетная схема робота-понтон с небольшой положительной плавучестью и якорно-тросово-гусеничными двигателями, находящегося в режиме квазистатического движения, представлена на рис. 2. Под квазистатическим режимом движения робота-понтон принимается движение с постоянной небольшой скоростью. Следствием этого является отклонение каждого из тросов якоря, взаимодействующего с дном, двигателя на малый угол α_j . Действительно, чтобы преодолеть силу сопротивления Q

$$Q = \mu V, \quad (1)$$

необходимо, чтобы

$$\sum_{j=1}^N T_j \sin \alpha_j = \mu V, \quad (2)$$

где μ – коэффициент вязкого сопротивления, зависящий от формы робота-понтон; N – количество грузов-якорей, взаимодействующих с грунтом.

Поэтому при малых скоростях V и силах натяжения, соизмеримых с весом якорей, $\sin \alpha_j \approx 0$; $\cos \alpha_j \approx 1$.

Рис. 2. Расчетная схема робота-понтон с якорно-тросово-гусеничным двигателем:

1 – корпус робота-понтон; 2 – ведущая звездочка гусеничной цепи; 3 – гусеничная цепь; 4 – трос j двигателя, установленного на расстоянии b_j от центра масс робота-понтон, веса G и взаимодействующего с грунтом. Вес G включает в себя и вес якорей, находящихся на тросах, закрепленных на верхней ветви гусеницы; 5 – якорь массы m ; 6 – трос не взаимодействующего с грунтом двигателя; 7 – провисший трос; Φ , a – соответственно выталкивающая сила и расстояние от центра масс робота-понтон до точки ее приложения; $L = L_1 + L_2$ – габаритный размер гусеничной цепи; e – расстояние между точками подвеса тросов; $H(x)$ – уравнение профиля дна от условного уровня; l – длина недеформированного троса; Y_c – координата центра масс робота-понтон; ϕ – угол дифферента, который считается малым

Таким образом, в состоянии квазистатического режима движения натяжение тросов определяется на основе уравнений «равновесия» робота-понтон:

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0; \quad \Phi - G - \sum_{j=1}^N T_j &= 0 \\ \sum M_c = 0; \quad \Phi a - \sum_{j=1}^N T_j b_j &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь N – количество движителей, тросы которых расположены на нижней ветви гусеницы

$$(N-1)e < L_1 + L. \quad (4)$$

Конкретное значение N зависит от положения точек подвеса тросов на гусенице, которое может изменяться в процессе движения. В общем случае тросы всех движителей, находящихся на нижней ветви гусеницы, можно разделить на три группы.

В первую, основную группу, следует отнести тросы в количестве N_1 , якоря которых взаимодействуют с грунтом, работают на растяжение и препятствуют всплытию робота-

понтон. Для этих N_1 тросов выполняются условия совместности деформаций (рис. 2)

$$T_j = c(Y_c + \phi b_j - H - l), \quad (5)$$

где c – жесткость троса.

Причем, при произвольном профиле дна

$$H = H(b_j). \quad (6)$$

Для тросов в количестве N_2 , якоря которых не взаимодействуют с грунтом (рис. 2),

$$T_j = mg. \quad (7)$$

Для оставшейся группы провисших тросов в количестве N_3 , якоря которых свободно лежат на грунте,

$$T_j = 0. \quad (8)$$

Причем

$$N_1 + N_2 + N_3 = N. \quad (9)$$

С учетом (5), (7), (8) уравнения (3) удобно привести к форме системы двух линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными величинами Y_c и ϕ :

$$\begin{cases} N_1 c Y_c + \sum_{j=1}^{N_1} c b_j \phi = \Phi - G + \sum_{j=1}^{N_1} c H_j + N_1 l c - N_2 m g \\ c \sum_{j=1}^{N_1} b_j Y_c + \sum_{j=1}^{N_1} c b_j^2 \phi = \Phi a + c \sum_{j=1}^{N_1} H_j b_j + c l \sum_{j=1}^{N_1} b_j - m g \sum_{j=1}^{N_2} b_j \end{cases} \quad (10)$$

Определение ориентации робота-понтон и усилий в тросах движителей

Особенность решения системы уравнений (10) состоит в том, что коэффициенты этих уравнений относятся к трем группам. Первая группа параметров – задаваемые: c , mg , l , Φ , G , e , a ; вторая группа – изменяемые в процессе движения робота

$$b_j = b_{j0} - \Delta = b_{j0} - V_0 t, \quad (11)$$

где Δ – относительное перемещение точек подвеса троса движителей.

Третья группа H_j определяется информационно-измерительной системой за счет сканирования конфигурации профиля дна, $H = H(x)$.

Неизвестным остается только количество движителей каждой группы N_1 , N_2 , N_3 .

Поэтому при решении системы уравнений (10) применяется метод последовательных приближений, состоящий в том, что на первом этапе произвольно задаются N_1 и N_2 , причем с известными номерами j .

Тогда для Y_c и ϕ имеют место уравнения:

$$\begin{cases} Y_c = \frac{(\Phi - G + \sum_{j=1}^{N_1} c H_j + N_1 l c - N_2 m g) \sum_{j=1}^{N_1} b_j^2 - (\Phi a + c \sum_{j=1}^{N_1} H_j b_j + c l \sum_{j=1}^{N_1} b_j - m g \sum_{j=1}^{N_2} b_j) \sum_{j=1}^{N_1} b_j}{N_1 c \sum_{j=1}^{N_1} b_j^2 - c (\sum_{j=1}^{N_1} b_j)^2} \\ \phi = \frac{N_1 (\Phi a + c \sum_{j=1}^{N_1} H_j b_j + c l \sum_{j=1}^{N_1} b_j - m g \sum_{j=1}^{N_2} b_j) - \sum_{j=1}^{N_1} b_j (\Phi - G + \sum_{j=1}^{N_1} c H_j + N_1 l c - N_2 m g)}{N_1 c \sum_{j=1}^{N_1} b_j^2 - c (\sum_{j=1}^{N_1} b_j)^2} \end{cases} \quad (12)$$

В результате решения (12) на следующем этапе производится вычисление сил натяжения. Так, если в соответствии с (5) для всех j движителей первой группы

$$0 < T_j < mg, \quad (13)$$

то эти движители в количестве N_1 действительно взаимодействуют с грунтом. Если хотя бы одно из $T_j > mg$, то соответствующий движитель должен находиться во второй группе. В этом случае количество движителей N_2 увеличивается, на такую же величину уменьшается количество движителей из первой группы N_1 .

Если $T_j < 0$, то соответствующий движитель переходит в третью группу, N_3 увеличивается на единицу.

Таким образом, после корректировки количества движителей в группах повторяется решение систем уравнений (12) и вновь осуществляется проверка до тех пор, пока все условия не окажутся выполненными.

Исследование влияния конструктивных параметров якорно-тросово-гусеничных движителей на ориентацию робота-понтон в квазистатическом режиме движения

В качестве модельной эталонной задачи производится расчет сил натяжений тросов для лабораторного макета робота понтона с исходными параметрами: $F = 15,0$ Н; $l = 0,06$ м; $G = 10,0$ Н; $mg = 2,5$ Н; $e = 0,06$ м; $c = 100000,0$ Н/м; $N = 4$.

Каждый из тросов последовательно перемещается в одинаковых диапазонах относительно робота-понтон, аналогично тракту гусеницы относительно корпуса гусеничной машины. Поэтому достаточно получить зависимость силы натяжения троса для одного движителя, для других тросов будут иметь место аналогичные зависимости.

Графики зависимости сил натяжения T первого якоря, вступившего в контакт с грунтом в момент времени, когда координата x модели робота-понтон равна нулю, представлены на рис. 3.

Рис. 3. Графики изменения параметров робота-понтон (см. также с. 30):
 $a - a = -0,005$ м; $b - a = 0$ м; $c - a = 0,005$ м; $d - a = 0,01$ м; $e - a = 0,015$ м

Рис. 3. Окончание

На рис. 3 представлены графики изменения сил натяжений тросов каждого груза-якоря лабораторного робота-понтон при перемещении, при котором расстояние между точкой приложения выталкивающей силы и центром масс макета робота понтона варьировалось в пределах $0,005 < a < 0,015$. Хорошо видно, что для данного лабораторного понтона диапазон расстояний между центром масс и центром выталкивающей силы, при котором понтон сохраняет контакт всех якорей-грузов с дном, лежит в пределах $-0,005 \dots 0,015$ м, что соответствует дифференту ϕ , который также указан на графиках. При дальнейшем увеличении параметра a происходит отрыв одного из якорей и, соответственно, провисание нити якоря с противоположной стороны платформы. Узкие пределы изменения угла дифферента платформы, при которых сохраняется контакт каждого якоря с поверхностью дна, подталкивают к выводу о необходимости управления дифферентом платформы. Сделать это предполагается возможным с помощью изменения координат точки центра масс – перемещая груз по платформе, либо поворотом якорно-гусенично-тросового движителя относительно продольной оси плавучей платформы; это станет предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Verichev, S. N. Deep mining: from exploration to exploitation/ Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference – St. Petersburg: VNIIOkeangeologia, 2014. – P. 126–138.
2. Подводно-технические работы. – Режим доступа : <http://www.птр.акваэко.рф/content/podvodnyu-transheekopatel>. – Загл. с экрана.
3. Amphibious Bulldozer. – Режим доступа : http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201312/Views_No20_amphibious_bulldozer.pdf. – Загл. с экрана.
4. Подводный экскаватор Menzi Muck подготавливает океанское дно к прокладке газопровода. – Режим доступа : http://www.exkavator.ru/main/news/inf_news/~id=7683. – Загл. с экрана.
5. Кабелеукладчик «Tyco Resolute». – Режим доступа : http://korabley.net/news/kabeleukladchik_tyco_resolute/2011-02-21-778. – Загл. с экрана.
6. Nautilus Minerals. – Режим доступа : <http://www.nautilusminerals.com>. – Загл. с экрана.
7. Jin-Ho Kim Cheon-Hong Min and Sup Hong Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot/ MineRo-II Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi // Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 2013. – P. 269–273.
8. Илларионов, Г. Ю. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин / Г. Ю. Илларионов, В. В. Сидоренко, С. В. Смирнов // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 31–39.
9. Yoo, S. Y. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster / S. Y. Yoo, B. H. Jun, H. Shim // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A. – September 2014. – Vol. 38, Issue 9. – P. 989–997.
10. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 6–14.
11. Шагающие машины / Д. Е. Охотимский, А. К. Платонов, А. А. Кирильченко, В. В. Лапшин // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, 1989. – 36 с.
12. Лапшин, В. В. Механика и управление движением шагающих машин / В. В. Лапшин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2012. – 199 с.
13. Концепция проектирования шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 33–38.
14. Об управлении адаптации ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, В. А. Серов, С. А. Устинин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 184–190.
15. 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.
16. П. м. 204261 U1 Российская Федерация, МПК В63Н 25/00 Двигатель для мобильной платформы / Е. С. Брискин, В. В. Гулевский, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021.