Раздел II. Управление в робототехнических и мехатронных комплексах

УДК 51-74+517.977.5+531.011 DOI 10.23683/2311-3103-2019-7-71-82

Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, М.В. Мирошкина

О ДИНАМИКЕ ПЕРЕНОСА ШАГАЮЩИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ*

Рассматривается задача определения программных режимов движения шагающих движителей подводных мобильных роботов на этапе их переноса в новое положение и при преодолении препятствий. Препятствия рассматриваются в форме выступа, известной высоты, бесконечно малой длины и расположенного на определенном расстоянии от места отрыва стопы от грунта. Идентификация препятствий осуществляется информационно-измерительной системой. Анализируются методы формирования программного режима движения переносимой стопы и ставится задача его определения на основе информации о профиле грунта. Обсуждаются методы, позволяющие исключить ударное взаимодействие и проскальзывание стоп на грунте. Составляются дифференциальные уравнения движения переносимой стопы, учитывающие силы сопротивления среды. Силы сопротивления принимаются линейно зависящими от скорости, физико-механические свойства среды при отрыве от него стопы не учитываются. Движение корпуса рассматривается как поступательное с прямолинейным и равномерным движением центра масс. Формируется критерий оптимальности движения переносимой стопы как материальной точки, состоящий из нескольких интегральных показателей качества движения (уровень тепловых потерь в приводных двигателях, среднеквадратичные горизонтальное и вертикальное ускорения стопы движителя и др.). Решается вариационная задача на двух этапах движения. Первый этап – до достижения препятствия, второй этап – после преодоления препятствия до постановки на грунт. Обосновывается расширение вариационной задачи определения минимума показателей качества как функций, зависящих от параметров движения: времени достижения препятствия и скорости переноса стопы через препятствие. Поставлена и решена модельная задача и проанализированы результаты. Установлены закономерности влияния скорости и режимов движения стопы на показатели качества движения. Определение программного режима основывается на выборе критерия оптимальности, составленного из различных интегральных показателей качества движения. Представлены графики изменения показателей качества, зависящие от скорости движения. Их характерной особенностью является – снижение эффективности движения с ростом скорости. Поэтому режим движения следует выбирать на основе компромисса между скоростью и учитываемыми показателями.

Подводный мобильный робот; многоногая шагающая машина; походка многоногого шагающего робота; критерий оптимальности энергозатрат; энергозатраты; среднеквадратичное ускорение.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90112.

E.S. Briskin, Ya.V. Kalinin, M.V. Miroshkina

ABOUT THE TRANSFER DYNAMICS IN WALKING MOVERS OF UNDERWATER MOBILE ROBOTS

The problem of determining the programmed modes of motion in walking underwater mobile robots at the stage of transfer to a new position and overcoming obstacles is considered. Obstacles are considered to be of a known height, an infinitely small width and located at a certain distance from the initial position of the robot's foot on the ground. Obstacles are identified by the information-measuring system. The methods of forming the programmed mode of movement of the transported foot are analyzed. The problem of development of movement based on information about the ground profile is considered. Methods to eliminate impact interaction and slippage of feet on the ground are discussed. The system of differential equations of motion of the transported foot is made, taking into account the resistance forces of the medium. Resistance forces are taken linearly dependent on speed, physical and mechanical properties of the medium when the feet are taking off, are not taken into account. The movement of the body is considered as translational with a rectilinear and uniform movement of the center of mass. An optimality criterion of the movement of the transported foot as a material point is formed, consisting of several integral indicators of the quality of the movement (the level of heat loss in the drive motors, the rms horizontal and vertical acceleration of the foot of the mover, etc.). The variational problem is solved at two stages of motion. The first stage is the movement before reaching the obstacle, the second stage is the movement after overcoming the obstacle before laying on the ground. The extension of the variational problem of determining the minimum of quality indicators as functions depending on the parameters of movement: the time to reach the obstacle and the speed of transfer of the foot through the obstacle is justified. The model problem is stated and solved, and the results are analyzed. The laws of the influence of speed and modes of movement of the foot on indicators of quality of movement are established. The definition of the program mode is based on the choice of the optimality criterion, composed of various integral indicators of the quality of movement. The graphs of changes in quality indicators, depending on the speed of movement, are presented. Their characteristic feature is a decrease in the efficiency of movement with increasing speed. Therefore, the mode of movement should be chosen on the basis of a compromise between speed and indicators taken into account.

Underwater mobile robot; multileg walking machine; the gait of multileg walking machine; optimality criterion for energy consumption; energy consumption; rms acceleration.

Введение. Особенностью мобильных роботов с шагающими движителями является возможность бесконтактного преодоления препятствий [1–19]. В этом, наряду с потенциальной идеальной маневренностью, и состоит их основное преимущество перед роботами с традиционными типами движителей, так как по другим важным показателям, таким как скорость передвижения, энергозатраты на единицу пути, они им уступают. Объясняется это тем, что шагающий движитель является неуравновешенным механизмом и поэтому его характеристики движения при переносе из одного положения в другое существенно влияют на обсуждаемые показатели. Известен закон переноса шагающих движителей [1], обеспечивающий комфортабельность движения мобильного робота (рис. 1). Действительно, в отсутствии информации о профиле грунта, траектория 2, в абсолютном движении переноса стопы шагающего робота из положения *A* в новое положение *B*, обеспечивает движение без «спотыкания» и «скольжения» при любом профиле грунта 1. Задача состоит только в том, чтобы установить закон движения по траектории [20].

Такой вид траектории объясняется еще и тем, что она была предложена при отсутствии развитой информационно-измерительной системы. Но при наличии достоверной информации о геометрических характеристиках профиля опорной поверхности траектория и, вообще, законы движения переносимой стопы могут быть другими, например, траектория может быть такой, как это показано на рис. 1 (кривая 3).

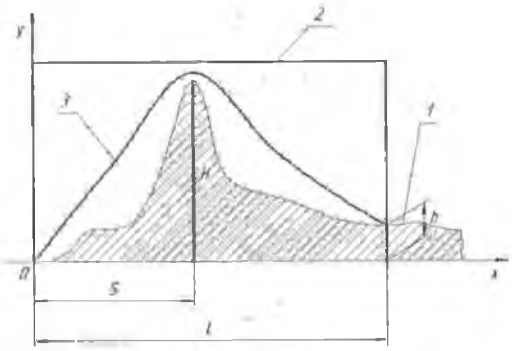

Рис. 1. Траектория переноса стопы движителя: 1 – профиль опорной поверхности; 2 – абсолютная траектория по Н.В. Умнову; 3 – возможная траектория; S – расстояние до препятствия, H – высота преодолеваемого препятствия, h – высота места постановки стопы

Зависит это от критерия оптимальности переноса, в общем случае состоящего из нескольких показателей, например, минимума тепловых потерь в приводных двигателях, минимума среднеквадратичной мощности, развиваемой двигателями, минимума пройденного пути и др. [21, 22]. Из этих показателей может быть построен критерий оптимальности и определены границы парето-оптимальных режимов движения [23]. Известны методы управления переносом стоп цикловых шагающих движителей машины «Восьминог-М» (рис. 2) при преодолении запрещенных зон за счет изменения походки [24].

Рис. 2. Шагающая машина «Восьминог-М»

Законы переноса стоп движителей в новое положение влияют и на энергоэффективность мобильных роботов с шагающими движителями [25]. Это подтверждается и для двуногих роботов [26]. Для шагающих роботов с ортогонально-поворотными движителями, например, для машины «Ортоног» (рис. 3) установлен закон вертикального перемещения стопы движителя в соответствии с критерием оптимальности, состоящего из нескольких показателей [27]. Также установлены законы отрыва стопы от грунта для подводного мобильного робота [28], подтвержденные экспериментально [29].

Однако задача определения оптимального программного движения стопы движителя подводного мобильного робота одновременно в горизонтальном и вертикальном направлениях при наличии препятствий не рассматривалась. Актуаль-

ность такой задачи обусловлена как гораздо большими силами сопротивления движению стоп в более плотной, по сравнению с воздухом, окружающей среде – воде, так и неровностью дна, вызывающего необходимость перешагивать через достаточно крупные препятствия.

Рис. 3. Шагающая машина «Ортоног»

Постановка задачи. Рассматривается перемещение стопы шагающего движителя подводного мобильного робота в вертикальной плоскости как материальной точки. В процессе перемещения стопа преодолевает уступ высотой H, расположенный на расстоянии S от точки A начала перемещения (рис. 1). В процессе движения на стопу действуют силы (рис. 4): P – разность между силой тяжести и выталкивающей силой, силы сопротивления движению R_x, R_y, пропорциональные скоростям движения $V_x = \dot{x}$, $V_y = \dot{y}$, силы, развиваемые приводами вертикального T и горизонтального F перемещения.

Таким образом, дифференциальные уравнения движения имеют вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F - \mu_x\dot{x} \\ m\ddot{y} = T - P - \mu_y\dot{y} \end{cases}, \tag{1}$$

где μ_x, μ_y – известные коэффициенты вязкого сопротивления жидкости, m – приведенная масса стопы.

Задаются граничные условия:

$$\begin{aligned} &\text{при } t = 0, x_0 = 0, y_0 = 0, \dot{x}_0 = 0,\ \dot{y}_0 = 0; \\ &\text{при } t = \tau, x_\tau = L, y_\tau = h, \dot{x}_\tau = 0,\ \dot{y}_\tau = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

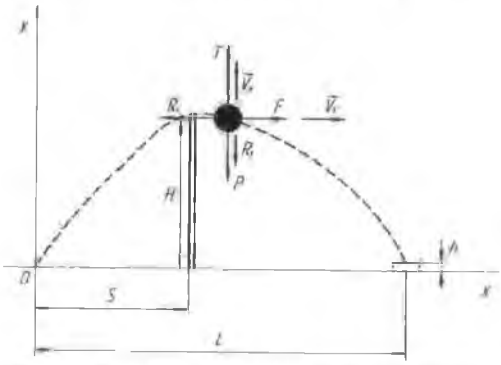

Рис. 4. Расчетная схема переноса стопы

Вводятся безразмерные показатели качества движения I_j, в совокупности, формирующие критерий эффективности I

$$I = \sum k_j I_j, \tag{3}$$

где k_j – весовые коэффициенты, определенные с точностью до постоянного множителя и подбираемые в соответствии со значимостью каждого показателя.

$$I_1 = \frac{1}{A}\left(\alpha_1 \int_0^\tau F^2 dt + \alpha_2 \int_0^\tau T^2 dt\right), \tag{4}$$

где I_1 – безразмерный уровень тепловых потерь в приводных двигателях, α_1, α_2 – известные постоянные, характеризующие двигатели приводов, A – задаваемая произвольно эталонная работа, например, $A = mgH$.

$$I_2 = \frac{1}{\tau g^2}\int_0^\tau \ddot{x}^2 dt;\ I_3 = \frac{1}{\tau g^2}\int_0^\tau \ddot{y}^2 dt, \tag{5}$$

I_2, I_3 – показатели, характеризующие безразмерный квадрат среднеквадратичного ускорения, g – ускорение свободного падения.

$$I_4 = \frac{\tau}{A^2}\int_0^\tau [(F\dot{x})^2 + (T\dot{y})^2]\, dt, \tag{6}$$

I_4 – показатель, характеризующий безразмерный квадрат среднеквадратичной мощности приводов.

Ставится задача определения таких законов движения $x = x(t)$ и $y = y(t)$, которые обеспечивают преодоление препятствия (рис. 1), удовлетворяют граничным условиям (2) и доставляют минимум функционалу (3).

Метод решения. Метод решения поставленной задачи основан на «разбиении» движения на два этапа.

Первый этап: $0 < t < \tau_1$:

$$\begin{gathered} x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad y(0) = 0, \quad \dot{y}(0) = 0, \\ x(\tau_1) = S, \quad \dot{x}(\tau_1) = U, \quad y(\tau_1) = H, \quad \dot{y}(\tau_1) = 0. \end{gathered} \tag{7}$$

Второй этап: $0 < t < \tau - \tau_1$:

$$\begin{gathered} x(0) = S, \quad \dot{x}(0) = U, \quad y(0) = H, \quad \dot{y}(0) = 0, \\ x(\tau - \tau_1) = L - S, \quad \dot{x}(\tau - \tau_1) = 0, \quad y(\tau - \tau_1) = h, \quad \dot{y}(\tau - \tau_1) = 0. \end{gathered} \tag{8}$$

Каждый из этапов характеризуется двумя управляющими параметрами U, τ_1, и на каждом из них ставится задача о минимуме функционала (3), что на каждом этапе приводит к уравнениям Эйлера-Пуассона [30]

$$\begin{gathered} \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}}\right) - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}}\right) + \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \\ \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}}\right) - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}}\right) + \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \end{gathered} \tag{9}$$

где $\Phi = \frac{k_1}{A}\left[\alpha_1(m\ddot{x} + \mu_x\dot{x})^2 + \alpha_2(m\ddot{y} + P + \mu_y\dot{y})^2\right] + \frac{k_2}{\tau g^2}\ddot{x}^2 + \frac{k_3}{\tau g^2}\ddot{y}^2 + + \frac{k_4\tau}{A^2}\left[(m\ddot{x} + \mu xx2x2 + (my + P + \mu yy)2y2\right.$.

При $k_4 = 0$ уравнения (9) имеют вид

$$\begin{cases} x^{\mathrm{IV}} - \lambda_x{}^2\ddot{y} = 0 \\ y^{\mathrm{IV}} - \lambda_y{}^2\ddot{y} = 0 \end{cases}, \tag{10}$$

где $\lambda_x = \mu_x/m$, $\lambda_y = \mu_y/m$.

Уравнения (10) решаются на каждом этапе при введенных граничных условиях (7), (8).

При этом оптимальность по выбранному критерию (3) на каждом из этапов в совокупности с выбором управляющих параметров U, τ_1 обеспечивает оптимальность на всем режиме движения.

Действительно, если функционал, определенный на интервале $[0, \tau]$, представить как сумму двух функционалов, определенных на интервале $[0, \tau_1]$ и $[\tau_1, \tau]$, то эта сумма будет зависеть от граничных условий при $t = \tau_1$. Равенство суммы функционалов исходному будет обеспечена в случае, если граничные условия (в решаемой задаче это управляющие воздействия U, τ_1 при задании координаты S) будут лежать на экстремали исходного функционала.

Решение дифференциальных уравнений (10) на каждом из этапов имеют вид

$$\begin{aligned} x(t) &= C_1 + C_2 t + C_3 e^{\lambda_x t} + C_4 e^{-\lambda_x t} \\ y(t) &= B_1 + B_2 t + B_3 e^{\lambda_y t} + B_4 e^{-\lambda_y t}. \end{aligned} \tag{11}$$

На первом этапе из граничных условий следует

$$\begin{cases} C_1 + C_3 + C_4 = 0 \\ C_2 + C_3\lambda_x - C_4\lambda_x = 0 \\ C_1 + C_2\tau_1 + C_3 e^{\lambda_x \tau_1} + C_4 e^{-\lambda_x \tau_1} = S \\ C_2 + C_3\lambda_x e^{\lambda_x \tau_1} - C_4\lambda_x e^{-\lambda_x \tau_1} = U \end{cases}$$

Откуда

$$\begin{gathered} C_3 = \frac{-\left[S\lambda_x\left(e^{-\lambda_x\tau_1} - 1\right) + U\left(e^{-\lambda_x\tau_1} - 1 + \lambda_x\tau_1\right)\right]}{D_x}; \\ C_4 = \frac{U\left(e^{\lambda_x\tau_1} - 1 - \lambda_x\tau_1\right) - S\lambda_x\left(e^{\lambda_x\tau_1} - 1\right)}{D_x}; \\ C_1 = -(C_4 + C_3);\ C_2 = (C_4 - C_3)\lambda_x. \end{gathered} \tag{12}$$

$$\begin{cases} B_1 + B_3 + B_4 = 0 \\ B_2 + B_3\lambda_y - B_4\lambda_y = 0 \\ B_1 + B_2\tau_1 + B_3 e^{\lambda_y \tau_1} + B_4 e^{-\lambda_y \tau_1} = H \\ B_2 + B_3\lambda_y e^{\lambda_y \tau_1} - B_4\lambda_y e^{-\lambda_y \tau_1} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{gathered} B_3 = -\frac{H\lambda_y\left(e^{-\lambda_y\tau_1} - 1\right)}{D_y};\ B_4 = -\frac{H\lambda_y\left(e^{\lambda_y\tau_1} - 1\right)}{D_y}; \\ B_1 = -(B_4 + B_3);\ B_2 = (B_4 - B_3)\lambda_y. \end{gathered} \tag{13}$$

На втором этапе, соответственно

$$\begin{cases} C_1 + C_3 + C_4 = 0 \\ C_2 + C_3\lambda_x - C_4\lambda_x = U \\ C_1 + C_2(\tau - \tau_1) + C_3 e^{\lambda_x(\tau-\tau_1)} + C_4 e^{-\lambda_x(\tau-\tau_1)} = L - S \\ C_2 + C_3\lambda_x e^{\lambda_x(\tau-\tau_1)} - C_4\lambda_x e^{-\lambda_x(\tau-\tau_1)} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{gathered} C_3 = \frac{-[L - S - U(\tau - \tau_1)]\lambda_x[e^{-\lambda_x(\tau-\tau_1)} - 1] + U[e^{-\lambda_x(\tau-\tau_1)} - 1 + \lambda_x(\tau - \tau_1)]}{D_x}; \\ C_4 = \frac{-(U[e^{\lambda_x(\tau-\tau_1)} - 1 - \lambda_x(\tau - \tau_1)] + [L - S - U(\tau - \tau_1)]\lambda_x[e^{\lambda_x(\tau-\tau_1)} - 1)])}{D_x}; \\ C_1 = -(C_3 + C_4);\ C_2 = U - \lambda_x(C_3 - C_4). \end{gathered} \tag{14}$$

$$\begin{cases} B_1 + B_3 + B_4 = H \\ B_2 + B_3\lambda_y - B_4\lambda_y = 0 \\ B_1 + B_2(\tau - \tau_1) + B_3 e^{\lambda_y(\tau-\tau_1)} + B_4 e^{-\lambda_y(\tau-\tau_1)} = -h \\ B_2 + B_3\lambda_y e^{\lambda_y(\tau-\tau_1)} - B_4\lambda_y e^{-\lambda_y(\tau-\tau_1)} = 0 \end{cases}$$

$$B_3 = \frac{(H+h)\lambda_y\left(e^{-\lambda_y(\tau-\tau_1)} - 1\right)}{D_y};\ B_4 = \frac{(H+h)\lambda_y\left(e^{\lambda_y(\tau-\tau_1)} - 1\right)}{D_y}; \tag{15}$$

$$B_1 = H - (B_3 - B_4); B_2 = (B_4 - B_3)\lambda_y.$$

Таким образом, после определения в соответствии с выражением (11) и уравнениями движения (1) переносимого движителя определяются все частные показатели и величина критерия оптимальности

$$I = \int_0^\tau \Phi\, dt. \tag{16}$$

Модельная задача определения оптимальных режимов движения и анализ результатов. Полное решение поставленной задачи, помимо определения оптимальных режимов движения на каждом из этапов, требует определения и двух дополнительных управляющих параметра U и τ_1, обеспечивающих минимум (16), в общем случае, и какого-либо показателя I_j, например, уровня тепловых потерь, в частности.

Метод определения таких управляющих параметров излагается на примере решения модельной задачи. Рассматривается шагающая машина типа «Ортоног» со сдвоенными механизмами шагания. Приведенная масса каждого механизма $m = 70$ кг, длина шага $L = 0{,}91$ м, постоянные, характеризующие двигатели приводов $\alpha_1 = \alpha_2 = 0{,}0001$. Скорость движения машины V связана с длиной шага и временем переноса стопы τ соотношением

$$V = \frac{L}{2\tau}. \tag{17}$$

Профиль грунта и положение машины перед препятствием описываются параметрами $H = 0{,}3$ м, $h = 0$, $S = 0{,}3L = 0{,}273$ м.

Таким образом, варьируемыми параметрами являются конструктивные λ_x, λ_y, которые характеризуют обтекаемость движителя внешней средой – водой, и искомые управляющие воздействия $U = \gamma V$, $\tau_1 = \varepsilon\tau = \varepsilon\frac{L}{2V}$, которые удобно задавать безразмерными параметрами γ и ε.

В результате математического моделирования получены зависимости безразмерных показателей ((4)–(5)) входящих в критерий оптимальности (3).

На графиках рис. 5 представлены зависимости уровня тепловых потерь в приводных двигателях от скорости движения при известных геометрических характеристиках профиля дна. Их анализ показывает, что существует оптимальный режим переноса стопы через препятствие, характеризуемый параметрами γ и ε, зависящих от профиля грунта.

На графиках рис. 6, 7 представлены соответственно зависимости безразмерных квадратов среднеквадратичных ускорений, которые так же подтверждают наличие оптимальных режимов, характеризуемых теми же параметрами γ и ε.

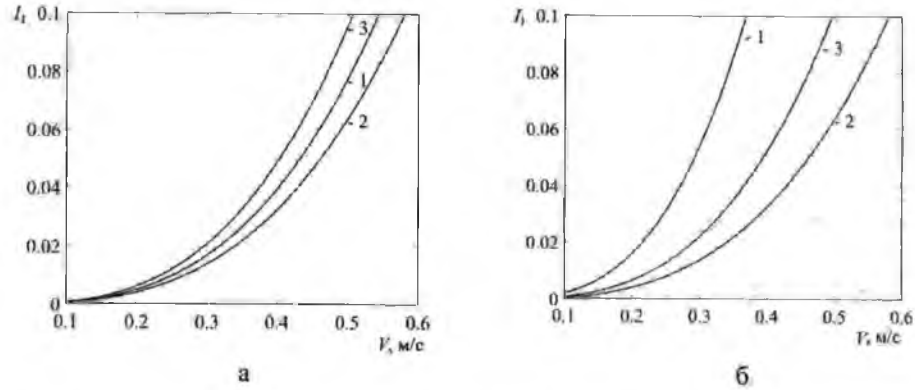

Рис. 5. Зависимость безразмерной величины уровня тепловых потерь в приводных двигателях от скорости движения: а – при $\varepsilon = 0{,}35$; 1 – $\gamma = 2$; 2 – $\gamma = 3$; 3 – $\gamma = 4$; б – при $\gamma = 3$; 1 – $\varepsilon = 0{,}2$; 2 – $\varepsilon = 0{,}35$; 3 – $\varepsilon = 0{,}5$.

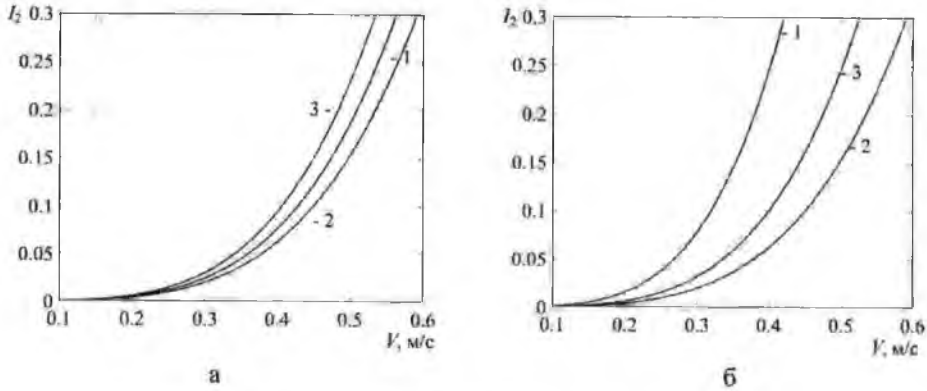

Рис. 6. Зависимость безразмерного квадрата среднеквадратичного горизонтального ускорения от скорости движения: а – при $\varepsilon = 0{,}35$; 1 – $\gamma = 2$; 2 – $\gamma = 3$; 3 – $\gamma = 4$; б – при $\gamma = 3$; 1 – $\varepsilon = 0{,}2$; 2 – $\varepsilon = 0{,}35$; 3 – $\varepsilon = 0{,}5$

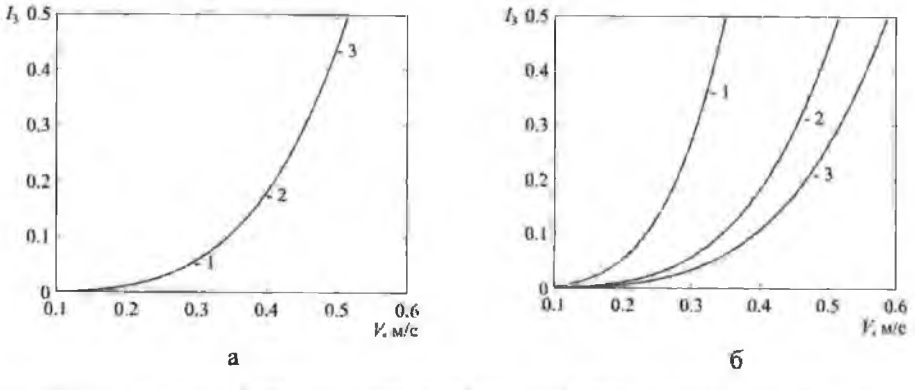

Рис. 7. Зависимость безразмерного квадрата среднеквадратичного вертикального ускорения от скорости движения: а – при $\varepsilon = 0{,}35$; 1 – $\gamma = 2$; 2 – $\gamma = 3$; 3 – $\gamma = 4$; б – при $\gamma = 3$; 1 – $\varepsilon = 0{,}2$; 2 – $\varepsilon = 0{,}35$; 3 – $\varepsilon = 0{,}5$

Выводы. Предложена расчетная схема и разработана математическая модель, описывающая динамику движения переносимой стопы шагающего движителя подводного мобильного робота. Сформулированы показатели, характеризующие оптимальность программного режима движения и разработаны методы их определения. Установлены зависимости показателей качества от скорости робота и управляющих параметров γ, ε. Например, для подводного шагающего робота с параметрами машины «Ортопог» и препятствия высотой $H = 0{,}3$ м, расположенного на расстоянии $S = 0{,}273$ м от точки начала переноса, оптимальная скорость стопы движителя во время переноса над препятствием должна быть в три раза выше скорости робота, а время движения до препятствия должно составлять 35 % от полного времени переноса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Артоболевский И.И., Умнов Н.В.* Некоторые проблемы создания шагающих машин // Вестник АН СССР. – 1969. – № 2. – С. 44.
2. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. – М.: Наука. Физматлит, 1984. – 312 с.
3. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В. и др.* Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 6-14.
4. *Павловский В.Е.* О разработках шагающих машин // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1-32.
5. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 3. – С. 143-155.
6. *Golubev Yu.F., Korianov V.V., Pavlovsky V.E., Panchenko A.V.* Maneuvering SixLegged Robot: Model and Prototype // Тр. III-го российско-тайваньского Симпозиума "Современные проблемы интеллектуальной мехатроники, механики и управления". 7-11. 11. 2012, МГУ / под ред. Ю.М. Окунева. – М.: Изд-во МГУ, 2012. CD. – С. 69-81.
7. *Golubev Yu.F., Korianov V.V., Pavlovsky V.E., Panchenko A.V.* Motion control for the 6-legged robot in extreme conditions // Proc. of the 16th Int. Conf. CLAWAR-2013. 14-17 July 2013, Sydney, Australia. – P. 427-434.
8. *Nonami K.* et al. Hydraulically Actuated Hexapod Robots: Design, Implementation and Control, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering 66, Springer Japan 2014. – 277 p.
9. RHex – Devours Rough Terrain. – Режим доступа: http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html.
10. Walking Tractor Timberjack by John Deere. – Режим доступа: http://www.theoldrobots.com/Walking-Robot2.html.
11. SIL06 – шестиногий робот-миноискатель. – Режим доступа: http://www.dailytechinfo.org/military/589-sil06-shestinogij-robot-minoiskatel.html.
12. I.C. Hexapod. – Режим доступа: http://www.micromagicsystems.com/#/ic-hexapod/4525033632.
13. Робот-насекомое по имени Hector делает свои первые шаги. – Режим доступа: http://www.dailytechinfo.org/robots/6573-robot-nasekomoe-po-imeni-hector-delaet-svoi-pervye-shagi.html.
14. CHEETAH – Fastest Legged Robot. – Режим доступа: http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html.
15. BigDog – The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth. – Режим доступа: http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html.
16. RiSE: The Amazing Climbing Robot. – Режим доступа: http://www.bostondynamics.com/robot_rise.html.
17. Meet Prospero: Robo-Farmer on Six Legs. – Режим доступа: http://news.discovery.com/tech/robotics/swarm-bots-111221.htm.
18. HexCrawler Robot. – Режим доступа: http://www.robotbooks.com/hexcrawler.htm.
19. *Накано Э.* Введение в робототехнику. – М.: Мир, 1988. – 334 с.

20. *Брискин Е.С., Соболев В.М.* Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движениями // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 3. – С. 28-34.
21. *Жога В.В.* Система показателей качества шагающих транспортных машин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 1997. – № 5. – С. 52-54.
22. *Малолетов А.В., Брискин Е.С.* Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями: монография. - Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 174 с.
23. *Соболь И.М., Статников Р.Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб. пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2006.
24. *Брискин Е.С.* Об управлении походкой шагающей машины «Восьминог» // Механика. Автоматизация. Управление. – 2008. – № 5. – С. 6-10.
25. *Брискин Е.С., Калинин Я.В.* Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170-176.
26. *Белецкий, В.В.* Динамика двуногой ходьбы // Известия АН СССР. МТТ. – 1975. – № 3. – С. 3-13.
27. *Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В. и др.* Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. - № 3. – С. 184-190.
28. *Брискин Е.С., Смирная Л.Д.* Об отрыве стопы шагающего движителя мобильного подводного робота от грунта // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 215-223.
29. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В.* Структура энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 6-18.
30. *Эльсгольц Л.Э.* Вариационное исчисление. – М.: URSS, 2019. – 208 с.

REFERENCES

1. *Artobolevskiy I.I., Umnov N.V.* Nekotorye problemy sozdaniya shagayushchikh mashin [Some problems of creating walking machines], *Vestnik AN SSSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR], 1969, No. 2, pp. 44.
2. *Okhotsimskiy D.E., Golubev Yu.F.* Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagayushchego apparata [Mechanics and motion control of an automatic walking device]. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1984, 312 p.
3. *Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. i dr.* Sravnitel'nyy analiz kolesnykh, gusenichnykh i shagayushchikh mashin [Comparative analysis of wheeled, tracked and walking machines], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical Cybernetics], 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 6-14.
4. *Pavlovskiy V.E.* O razrabotkakh shagayushchikh mashin [On the development of walking machines], *Preprint IPM im. M.V. Keldysha* [Keldysh Institute Preprints], 2013, No. 101, pp. 1-32.
5. *Golubev Yu.F., Koryanov V.V.* Postroenie dvizheniy insektomorfnogo robota, preodolevayushchego kombinatsiyu prepyatstviy s pomoshch'yu sil kulonovskogo treniya [The construction of movements insectborne robot that overcomes a combination of obstacles with the help of the forces of coulomb friction], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2005, No. 3, pp. 143-155.
6. *Golubev Yu.F., Korianov V.V., Pavlovsky V.E., Panchenko A.V.* Maneuvering SixLegged Robot: Model and Prototype, *Tr. III-go rossiysko-tayvan'skogo Simpoziuma "Sovremennye problemy intellektual'noy mekhatroniki, mekhaniki i upravleniya", 7-11. 11. 2012, MGU* [Proceedings of the III Russian-Taiwanese Symposium "Modern problems of intellectual mechatronics, mechanics and control", 7-11. 11. 2012, Moscow state University], ed. by Yu.M. Okuneva. Moscow: Izd-vo MGU, 2012. CD, pp. 69-81.
7. *Golubev Yu.F., Korianov V.V., Pavlovsky V.E., Panchenko A.V.* Motion control for the 6-legged robot in extreme conditions, *Proc. of the 16th Int. Conf. CLAWAR-2013. 14-17 July 2013, Sydney, Australia*, pp. 427-434.
8. *Nonami K.* et al. Hydraulically Actuated Hexapod Robots: Design, Implementation and Control, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering 66, Springer Japan 2014, 277 p.

9. RHex – Devours Rough Terrain. Available at: http://www.bostondynamics.com/ robot_rhex.html.
10. Walking Tractor Timberjack by John Deere. Available at: http://www.theoldrobots.com/ Walking-Robot2.html.
11. SIL06 – шестиногий робот-миноискатель. Available at: http://www.dailytechinfo.org/ military/589-sil06-shestinogij-robot-minoiskatel.html.
12. I.C. Hexapod. Available at: http://www.micromagicsystems.com/#/ic-hexapod/4525033632.
13. Robot-nasekomoe po imeni Hector delaet svoi pervye shagi [A robot insect named Hector takes its first steps]. Available at: http://www.dailytechinfo.org/robots/6573-robot-nasekomoe-po-imeni-hector-delaet-svoi-pervye-shagi.html.
14. CHEETAH – Fastest Legged Robot. Available at: http://www.bostondynamics.com/robot_ cheetah.html.
15. BigDog – The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth. Available at: http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html.
16. RiSE: The Amazing Climbing Robot. Available at: http://www.bostondynamics.com/ robot_rise.html.
17. Meet Prospero: Robo-Farmer on Six Legs. Available at: http://news.discovery.com/ tech/robotics/swarm-bots-111221.htm.
18. HexCrawler Robot. Available at: http://www.robotbooks.com/hexcrawler.htm.
19. *Nakano E.* Vvedenie v robototekhniku [Introduction to robotics]. Moscow: Mir, 1988, 334 p.
20. *Briskin E.S., Sobolev V.M.* Tyagovaya dinamika shagayushchikh mashin s ortogonal'nymi dvizheniyami [Traction dynamics of walking machines with orthogonal movements], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 1990, No. 3, pp. 28-34.
21. *Zhoga V.V.* Sistema pokazateley kachestva shagayushchikh transportnykh mashin [System of quality indicators for walking transport vehicles], *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Guide. Engineering magazine with app], 1997, No. 5, pp. 52-54.
22. *Maloletov A.V., Briskin E.S.* Optimizatsiya struktury, parametrov i rezhimov dvizheniya shagayushchikh mashin so sdvoennymi dvizhitelyami: monografiya [Optimization of the structure, parameters and modes of movement of walking machines with twin engines: monograph]. Volgograd: VolgGTU, 2015, 174 p.
23. *Sobol' I.M., Statnikov R.B.* Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami: ucheb. posobie dlya vuzov [Choosing optimal parameters for problems with many criteria: a textbook for universities]. Moscow: Drofa, 2006.
24. *Briskin E.S.* Ob upravlenii pokhodkoy shagayushchey mashiny «Vos'minog» [On managing the gait of the walking machine "Octopus"], *Mekhanika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechanics. Automation. Management], 2008, No. 5, pp. 6-10.
25. *Briskin E.S., Kalinin Ya.V.* Ob energeticheski effektivnykh algoritmakh dvizheniya shagayushchikh mashin s tsiklovymi dvizhitelyami [On energy-efficient algorithms for the movement of walking machines with cyclic engines], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2011, No. 2, pp. 170-176.
26. *Beletskiy V.V.* Dinamika dvunogoy khod'by [Dynamics of two-legged walking], *Izvestiya AN SSSR. MTT* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics], 1975, No. 3, pp. 3-13.
27. *Briskin E.S., Kalinin Ya.V., Maloletov A.V. i dr.* Ob upravlenii adaptatsiey ortogonal'nykh shagayushchikh dvizhiteley k opornoy poverkhnosti [On managing the adaptation of orthogonal walking thrusters to the reference surface], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2017, No. 3, pp. 184-190.
28. *Briskin E.S., Smirnaya L.D.* Ob otryve stopy shagayushchego dvizhitelya mobil'nogo podvodnogo robota ot grunta [On the separation of the foot of the walking mover of a mobile underwater robot from the ground], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical Cybernetics], 2019, Vol. 7, No. 3, pp. 215-223.
29. *Chernyshev V.V., Arykantsev V.V.* Struktura energozatrat shagayushchikh mashin i robotov pri realizatsii bol'shikh tyagovykh usiliy [Structure of energy consumption of walking machines and robots when implementing large traction forces], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 6-18.
30. *El'sgol'ts L.E.* Variatsionnoe ischislenie [Calculus of variations]. Moscow: URSS, 2019, 208 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.А. Несмиянов.

Брискин Евгений Самуилович – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: dtm@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28; тел.: 89023846717; кафедра теоретической механики; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Калинин Ярослав Владимирович – тел.: 89275294159; кафедра прикладной математики; к.т.н.; доцент.

Мирошкина Мария Владимировна – e-mail: mariatiminen@yandex.ru; 400123, г. Волгоград, ул. Вогульская, 31; тел.: 89375549636; кафедра теоретической механики; аспирант; м.н.с.

Briskin Eugeny Samuilovich – Volgograd State Technical University; e-mail: dtm@vstu.ru; 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russia; phone: +79023846717; the department of theoretical mechanics; head of department; dr. of phys.-math. sciences; professor.

Kalinin Yaroslav Vladimirovich – phone: +79275294159; the department of applied mathematics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Miroshkina Maria Vladimirovna – e-mail: mariatiminen@yandex.ru; 31, Vogulskaya street, Volgograd, 400123, Russia; phone: +79375549636; the department of theoretical mechanics; postgraduate, junior researcher.

УДК 681.5 DOI 10.23683/2311-3103-2019-7-82-92

М.Ю. Кензин, И.В. Бычков, Н.Н. Максимкин

КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ МОНИТОРИНГ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ*

Применение скоординированных групп автономных транспортных средств представляется наиболее перспективной и многообещающей технологией, позволяющей обеспечивать оперативное освещение труднодоступных регионов с высоким разрешением как по времени, так и в пространстве. При этом неизбежно возникают задачи коллективного распределения заданий и планирования индивидуальных маршрутов, когда каждому транспортному средству в группе должен быть поставлен в соответствие ряд обследовательских работ в разных областях региона. Построение допустимого и эффективного группового маршрута является задачей высокой вычислительной сложности даже в наиболее простых классических постановках с одним типом ограничений. В работе рассматривается задача динамической маршрутизации группы автономных транспортных средств при выполнении комплексного мультиобъектного мониторинга. Задача группы в этом случае заключается в своевременном обследовании заданного множества объектов с установленной периодичностью и в соответствии с требованиями, поставленными в соответствие каждому такому объекту. В качестве требований могут выступать в различном сочетании ограничения пространственного, временного или функционального характера. Такие задачи маршрутизации, объединяющие в себе целый спектр ограничений и требований различной природы, в современной литературе принято относить к классу комплексных или мульти-атрибутных задач маршрутизации. Подобные расширенные постановки, нацеленные на более точное моделирование реальных задач, на данный момент являются недостаточно изученными и, в то же время, представляют большой научно-исследовательский интерес. Для эффективной генерации допустимых маршрутов предлагается использование децентрализованного гибридного эволюционного подхода с применением специализированных эвристик, продвинутых схем локального поиска и дополнительных процедур улучшения решений. Динамическая корректировка внутренних параметров алгоритма в реальном времени обеспечивает максимальную эффективность вычислительной процедуры для каждого конкретного набора условий и на каждом этапе вычислений.

* Работа выполнена при поддержке РНФ №16-11-00053П.