

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 531.8,681.5

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
МОБИЛЬНОГО ГУСЕНИЧНОГО РОБОТА
С МАГНИТНО-ЛЕНТОЧНЫМ ПРИНЦИПОМ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**© 2019 г. М. С. Товарнов¹, Н. В. Быков^{1,*}¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия***e-mail: bykov@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 24.08.2017 г.

Принята к публикации 18.02.2019 г.

Разработан магнитно-ленточный механизм вертикального перемещения мобильного робота. Предложена математическая модель движения мобильного робота по наклонным и отвесным поверхностям. Рассмотрены основные иерархические элементы математической модели. Разработан метод автоматизированного формирования системы дифференциальных уравнений для сложных механических систем. Исследована устойчивость движения мобильного робота и зависимость мощности приводных двигателей от скорости движения.

Ключевые слова: мобильный робот, магнитно-ленточный механизм, клеевой метод перемещения, магнитный метод перемещения, гибридный метод перемещения, математическое моделирование, робот вертикального перемещения, математическое моделирование

DOI: 10.1134/S0235711919030131

Введение. Под роботами вертикального перемещения (РВП) понимают мобильных роботов, способных передвигаться по вертикальным поверхностям. Однако в более широком значении робот должен уметь перемещаться также по горизонтальным и наклонным поверхностям, произвольно ориентированным в пространстве. Создание робота вертикального перемещения на новых принципах в настоящее время является активно развивающимся научно-техническим направлением [1–4]. За последние два десятилетия предложено большое количество вариантов механизмов перемещения роботов, среди которых наибольшую популярность имеют адгезионные (в том числе электроадгезионные) [5–7], магнитные [8–10], вакуумные [11–13], и принципы, основанные на полимерах с микроструктурами (“лапы геккона”) [14, 15]. Развиваются также и другие методы [16–18].

Можно выделить три большие области применения РВП. Наибольшую популярность приобрели роботы для решения задач неразрушающего контроля строительных, промышленных и технических объектов [19–22]. Ко второй группе задач, решаемых с помощью РВП относятся задачи очистки (или покраски) труднодоступных или потенциально опасных для человека мест [2, 19, 23, 24]. В качестве третьей группы задач для РВП можно выделить задачи в сфере безопасности – помощи военным, полицейским и специальным службам [1, 5, 25, 26].

Роботы вертикального перемещения можно классифицировать по различным признакам, выбор которых диктуется преимущественно областью применения. С точки

зрения применения роботов в сфере антитеррористической безопасности, на передний план выходит энергетическая автономность робота, т.е. возможность нести на борту все необходимые элементы энергосистемы. По этому признаку все механизмы перемещения можно разделить на активные, требующие внешнего подвода энергии, и пассивные. К последним относятся магнитные принципы (с использованием пассивных магнитов), пассивные вакуумные методы (присоски), полимерная адгезия и использование клеев. Как пассивный, так и активный магнитный метод в чистом виде можно использовать только на металлических поверхностях. Присоски и полимерная адгезия очень чувствительны к загрязнению, что делает их использование в практических условиях ненадежным. Сложность клеевого метода состоит в том, что после приклеивания требуется обеспечить отрыв робота от поверхности. Таким образом существующие методы, применяемые в чистом виде (моно-методы), нельзя рекомендовать для практического применения в реальных условиях с учетом загрязнения, произвольных поверхностей и т.п.

В настоящей статье предложен гибридный механизм вертикального перемещения роботов по поверхностям внутри закрытых помещений [27, 28]. Вертикальное закрепление робота осуществляется посредством тонкой металлической ленты, на которую с одной стороны нанесен клеевой слой, приклеивающий ленту к поверхности (стене), а робот фиксируется на ленте с помощью системы пассивных магнитов, встроенных в гусеничные траки. Предложенный гибридный метод является сочетанием двух пассивных механизмов и позволяет РВП осуществлять перемещение не только по вертикали, но и по горизонтали.

Принцип действия механизма перемещения РВП. Механизм перемещения мобильного робота представляет собой корпус с четырьмя подвижными гусеничными парами (рис. 1). Каждая гусеничная пара оборудована своим двигателем и силовым приводом, что позволяет вращать всю гусеничную пару. Крепление робота к вертикальной поверхности осуществляется посредством металлической ленты, наклеиваемой одной стороной на вертикальную поверхность (стену), и постоянных магнитов, встроенных в траки гусеничных лент. Подача ленты осуществляется с помощью специального механизма катушечного типа. В случае передвижения робота по горизонтальной поверхности используются четыре гусеничных трака без использования ленты.

Достоинством предложенного механизма является его полная пассивность, т.к. энергия затрачивается только на движение гусеничных траков. В качестве недостатков выступает то, что лента после продвижения робота остается на поверхности, а запас вертикального хода обусловлен запасом ленты, которая выступает в качестве элемента полезной нагрузки. Таким образом, подбор длины ленты (и, как следствие, ее массы), осуществляется оптимальным образом для каждой конкретной задачи. Помимо этого, такой механизм затрудняет маневрирование робота по вертикальной поверхности, в результате чего его движение по вертикальным и наклонным поверхностям ограничивается практически прямолинейными траекториями.

Методика моделирования механизма перемещения РВП. При описании мобильного робота, представляющего собой сложный механизм, применен обобщенный подход к составлению математических моделей системы материальных тел. Все подвижные элементы робота рассматриваются как отдельные абсолютно твердые тела, воспринимающие внешние силы. Каждое материальное тело имеет свою локальную систему координат с началом в центре масс тела, и осями, жестко связанными с самим телом, обладает собственной массой m и тензором инерции J . На каждый из этих элементов действует сила тяжести. Положение в мировом трехмерном декартовом пространстве каждого материального тела определяется при помощи радиус-векто-

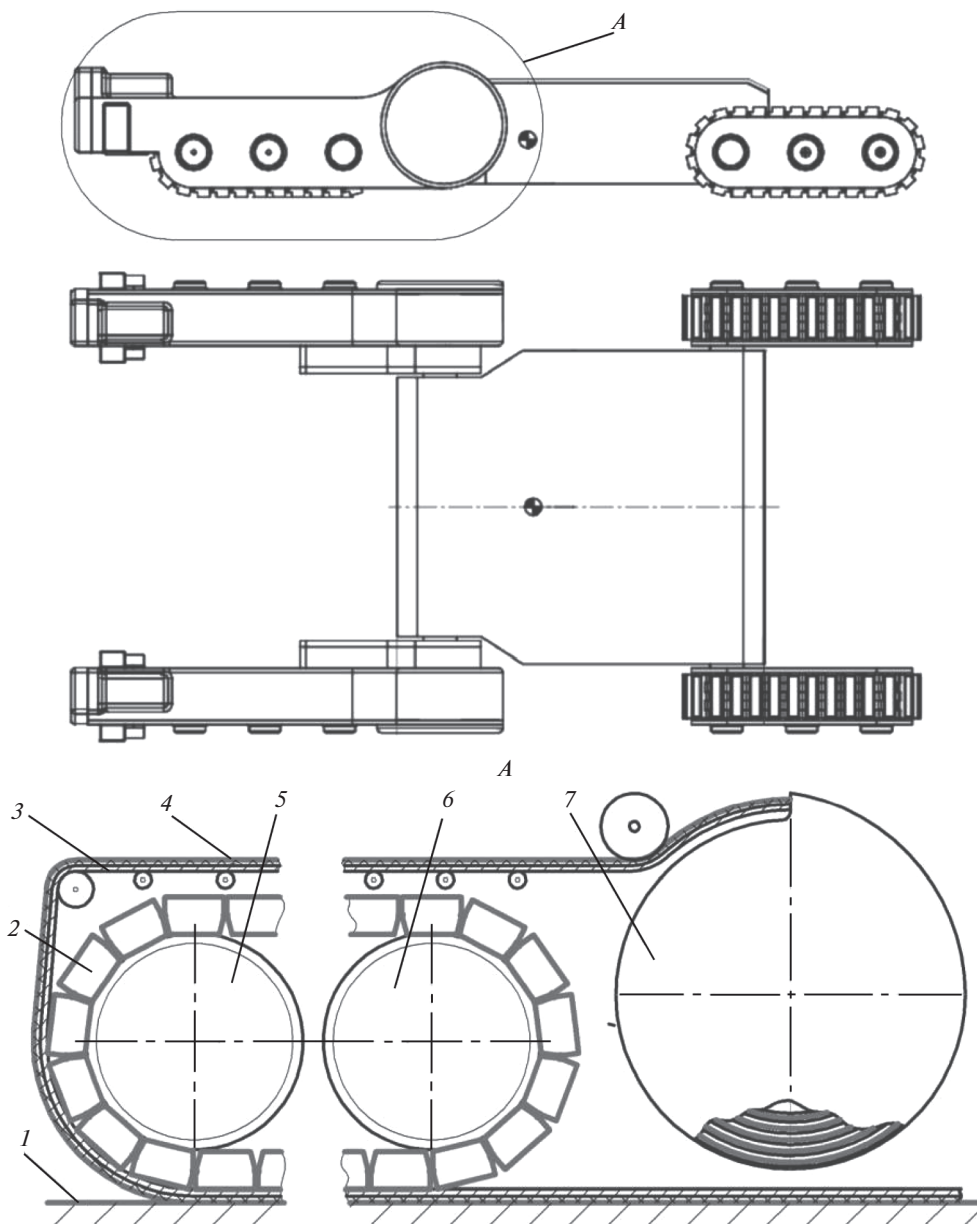


Рис. 1. Механизм перемещения РВП (1 – поверхность; 2 – магнитный трак; 3 – металлическая часть ленты; 4 – клейкая часть ленты; 5 – ведомый каток; 6 – ведущий каток; 7 – катушка с магнитной лентой).

ра центра масс тела $\mathbf{R}_{\text{цм}} = (X, Y, Z)^T$ и матрицы направляющих косинусов \mathbf{A} локальной системы координат, связанной с телом. Матрица \mathbf{A} формируется из кватерниона $\mathbf{q} = (q_w, q_x, q_y, q_z)$, описывающего поворот связанной системы координат относительно мировой [29].

Динамика каждого материального тела описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{R}_{\text{ЦМ}}}{dt} = \mathbf{V}_{\text{ЦМ}}; \\ \frac{d\mathbf{V}_{\text{ЦМ}}}{dt} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i; \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{J}^{-1} \times \left(\sum_{j=1}^m \mathbf{A}^T \mathbf{M}_j + \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{A}^T \mathbf{F}_i - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} \right); \\ \frac{dq_w}{dt} = -\frac{1}{2} (\omega_x q_x + \omega_y q_y + \omega_z q_z); \\ \frac{dq_x}{dt} = \frac{1}{2} (\omega_x q_w - \omega_y q_z + \omega_z q_y); \\ \frac{dq_y}{dt} = \frac{1}{2} (\omega_y q_w - \omega_z q_x + \omega_x q_z); \\ \frac{dq_z}{dt} = \frac{1}{2} (\omega_z q_w - \omega_x q_y + \omega_y q_x), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{\text{ЦМ}} = (V_x, V_y, V_z)^T$ – скорость центра масс тела; $\mathbf{F}_i = (F_x, F_y, F_z)^T$ – i -я сила, действующая на материальное тело; $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – угловая скорость вращения локальной системы координат (компоненты вектора берутся в связанной системе координат); \mathbf{J}^{-1} – матрица, обратная матрице тензора инерции тела; $\mathbf{M}_j = (M_x, M_y, M_z)^T$ – j -й момент, действующий на материальное тело; $\mathbf{r}_i = (x, y, z)^T$ – радиус-вектор точки приложения i -й силы в связанной системе координат.

Таким образом, положение, скорость и скорость вращения каждого тела в трехмерном пространстве задается вектором, содержащим 13 компонентов:

$$\mathbf{Y} = (X, Y, Z, V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, q_w, q_x, q_y, q_z)^T$$

Динамика тела определяется соответствующей векторной функцией $\mathbf{Y}(t) = f(t, \mathbf{Y})$ и моделируется посредством численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1).

Взаимодействие между элементами механизма перемещения РВП происходит посредством приложения к ним сил и моментов согласно следующей иерархии (рис. 2). Корпус РВП взаимодействует только с катками, расположенными на нем, каждый каток в свою очередь взаимодействует с корпусом и всеми траками своей гусеницы (но только когда трак находится в достаточной близости от катка), а каждый трак гусеницы взаимодействует с соседними траками, всеми катками, на которых расположена гусеница и всеми поверхностями (пол, потолок).

Особенностью модели корпуса РВП является его связь с гусеничными катками. Каждый каток имеет всего одну степень свободы относительно корпуса, а именно вращение вокруг жестко закрепленной оси. Такого рода взаимодействие влияет на расчет тензора инерции корпуса и сил, действующих на корпус. Любая внешняя для комбинации “корпус-каток” сила, действующая на каток, будет полностью воздействовать и на корпус. Воздействие силы на каток проявляется только по воздействию момента этой силы относительно оси вращения катка на корпус.

К гусеничному траку в 11 точках приложены силы (рис. 2). В точках 1–4 приложены упругодиссипативные силы, отвечающие за взаимодействие между соседними трака-

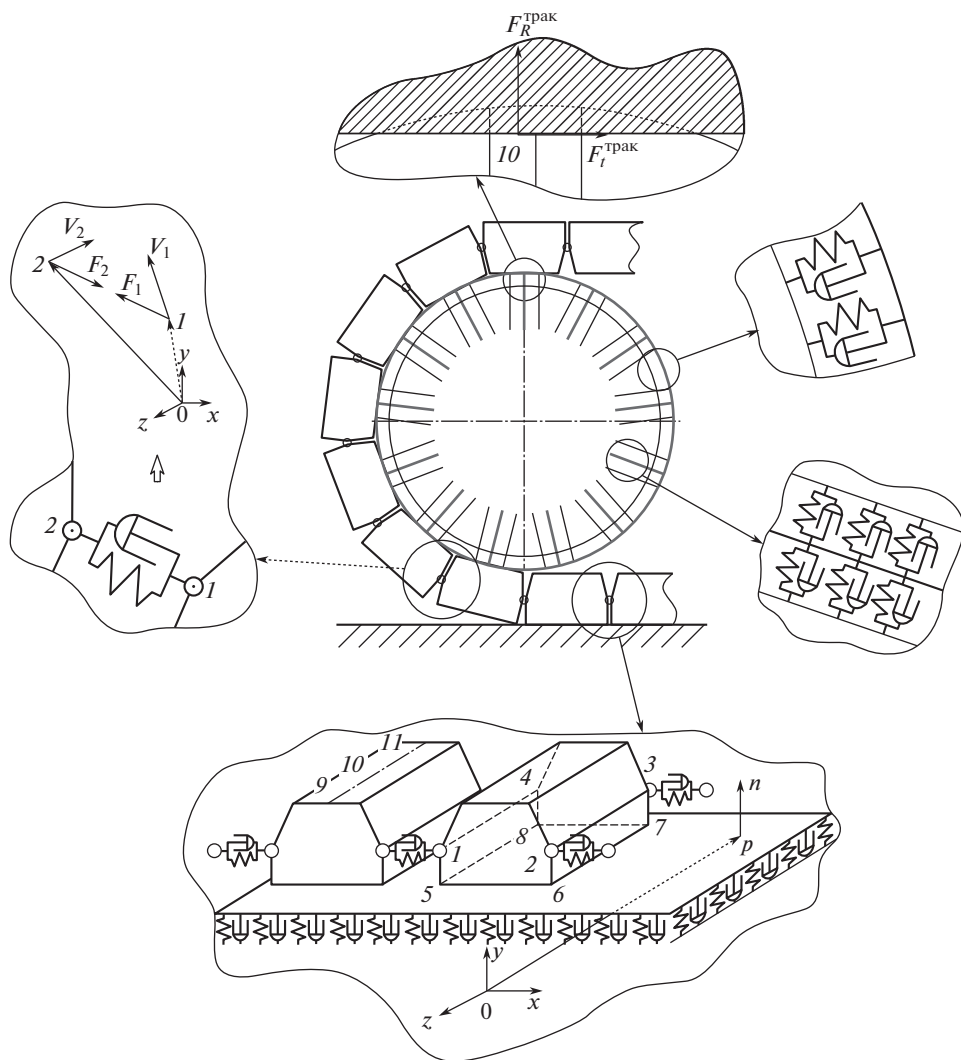


Рис. 2. Взаимодействия гусеничных трактов (точки 1–4 для взаимодействия между собой, 5–8 – с поверхностью движения, 9–11 – с гусеничными катками).

ми. Между каждой парой взаимодействующих точек возникает пара сил, каждая из которых приложена к своей точке

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{r}_1[k(|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1| - l_0) + \mu(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{V}_1 - \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{V}_2)]; \quad \mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_1,$$

где $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ – радиус-векторы точек 1 и 2, между которыми возникают силы; $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ – скорости точек 1 и 2; $\mathbf{r}_1 = (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1)/|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1|$ – единичный вектор, указывающий расположение точки 2 относительно точки 1; k – коэффициент упругости связи между точками; l_0 – нейтральное расстояние между точками, при котором упругие силы взаимодействия между точками равны нулю; μ – коэффициент “вязкости” связи между точками.

Точки 5–8 служат для взаимодействия трака с поверхностями, по которым перемещается робот. Точки 9–11 служат для взаимодействия трака с гусеничными катками механизма перемещения.

Взаимодействие гусеничного катка с траками происходит посредством упругодиссипативных сил, возникающих при приближении трака к катку. При нахождении трака вне границ катка взаимодействие отсутствует. При приближении к центру катка на расстояние радиуса катка в точках 9–11 трака появляются отталкивающие силы $\mathbf{F}_R^{\text{трак}} = -\mathbf{F}_R^{\text{кат}}$, направленные перпендикулярно оси вращения катка (рис. 2). Силы $\mathbf{F}_R^{\text{трак}}$ приложены к траку в точках 9 и 11, к катку приложены силы $\mathbf{F}_R^{\text{кат}}$ в тех же точках пространства. В зонах катка, имитирующих зацепление, в случае отклонения от места зацепления, появляются тангенциальные силы $\mathbf{F}_i^{\text{трак}} = -\mathbf{F}_i^{\text{кат}}$, возвращающие трак в нейтральную зону. Сила $\mathbf{F}_i^{\text{трак}}$ приложена к траку в точке 10, направлена перпендикулярна к радиусу катка и удерживает трак в “зацеплении”. Аналогично при осевом смещении трака возникают удерживающие силы в осевом направлении.

Каждая поверхность, по которой перемещается робот, задается двумя векторами. Точка, принадлежащая поверхности, определяется радиус-вектором \mathbf{p} , нормаль к поверхности – единичным вектором \mathbf{n} . Условие возникновения взаимодействия точки с поверхностью определяется как $(\mathbf{t} - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{n} \leq 0$.

Сила взаимодействия точки с поверхностью складывается из двух составляющих: нормальной и тангенциальной (силы трения). Нормальная составляющая рассчитывается по формуле

$$\mathbf{N} = -\mathbf{n}(k(\mathbf{t} - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{n} + \mu \xi(\mathbf{V})\mathbf{V} \cdot \mathbf{n});$$

$$\xi(\vec{V}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} < 0; \\ 0, & \end{cases}$$

где \mathbf{t} – радиус-вектор точки, взаимодействующий с поверхностью; \mathbf{V} – абсолютная скорость точки; k – коэффициент упругости связи; μ – коэффициент “вязкости”.

Сила трения рассчитывается стандартным образом:

$$\mathbf{F}_{\text{тр}} = \begin{cases} -|\mathbf{N}|k_{\text{тр}} \frac{\mathbf{V}_{\tau}}{|\mathbf{V}_{\tau}|}, & \text{если } |\mathbf{V}_{\tau}| > 0; \\ -|\mathbf{N}|k_{\text{тр}} \frac{\sum \mathbf{F}_{\tau}}{|\sum \mathbf{F}_{\tau}|}, & \text{если } |\sum \mathbf{F}_{\tau}| > |\mathbf{N}|k_{\text{тр}} \ \& \ |\mathbf{V}_{\tau}| = 0; \\ -\sum \mathbf{F}_{\tau}, & \text{если } |\sum \mathbf{F}_{\tau}| \leq |\mathbf{N}|k_{\text{тр}} \ \& \ |\mathbf{V}_{\tau}| = 0, \end{cases}$$

где $\mathbf{V}_{\tau} = \mathbf{V} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{V})$ – тангенциальная составляющая скорости к поверхности точки соприкосновения тела с поверхностью; $\sum \mathbf{F}_{\tau} = \sum_i [\mathbf{F}_i - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{F}_i)]$ – тангенциальная составляющая равнодействующей всех сил, приложенных к телу, к поверхности; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

Совокупность систем дифференциальных уравнений (1) для каждого тела, входящего в состав механизма перемещения, можно представить в виде одной системы дифференциальных уравнений первого порядка. Для механизма, состоящего из корпуса, 8 катков и 4 гусениц по 32 трака в каждой, система дифференциальных уравнений будет состоять из 1782 уравнений первого порядка. Непосредственное написание такой системы слишком затратно по времени и нецелесообразно. Поэтому для автоматизации процесса формирования системы дифференциальных уравнений была разработана специальная методика и ее программная реализация.

Таблица 1. Начальные данные для расчета

Параметр	Значение
Масса мобильного робота, кг	2.0–3.43
Мощность одного двигателя, Вт	2.0–7.0
Сила магнитного притяжения трака, Н	2.17 Н
Коэффициент трения между траком и лентой	0.87
Габариты робота, мм	350 × 210 × 45
Количество траков в гусеничном модуле, шт	28

Все объекты, входящие в состав механизма перемещения, образуют древовидную иерархическую структуру, позволяющую обобщить и рекурсивно использовать методы, необходимые для формирования вектора дифференциалов на каждом шаге интегрирования в широком диапазоне структурных вариантов построения механизма. При каждом вызове функции $f(t, Y)$ сначала происходит инициализация значений всех дифференцируемых параметров значениями, полученными из вектора Y . Эта процедура имеет рекурсивный характер и сначала вызывается у самого объекта, а потом у всех его “подчиненных”, стоящих ниже по иерархии. Далее рекурсивно вызываются процедуры, отвечающие за обновление всех параметров у объектов. После выполнения этих действий все дерево объектов, которое описывает динамику механизма перемещения, является полностью синхронизированным ко времени t_i и набору параметров Y_i . Затем идет формирование вектора производных посредством вызова функций, отвечающих за производные всех дифференцируемых параметров.

Результаты моделирования механизма перемещения РВП. В процессе движения робота по вертикальной поверхности происходит процесс размотки и склеивания с поверхностью металлической ленты. Необходимым условием наклеивания ленты на поверхность является обеспечение на некоторое время прижимающей силы в месте контакта. Такая сила возникает на передней точке контакта передних гусеничных модулей РВП при их повороте в сторону поверхности. Продолжительность приложения такой силы определяется скоростью движения робота.

В процессе исследования прижимающих сил робота моделировалась ситуация движения по вертикальной плоскости с постепенным увеличением угла поворота передних гусеничных модулей. В начальный момент времени робот находится на вертикальной поверхности.

В табл. 1 указаны параметры, при которых проводились расчеты.

На рис. 3 показана зависимость прижимающей силы от угла поворота передних модулей. Угол, при котором достигается максимальная сила, прижимающая ленту, находится в диапазоне (3–4)°. Флуктуации на графиках обусловлены случайными процессами, связанными с циклическим входением и выходением в контакт магнитных гусеничных траков с лентой.

С увеличением угла поворота модулей происходит перераспределение удерживающих сил между передними и задними гусеничными модулями (рис. 4). Общая сила становится недостаточной для стабильного удержания робота на вертикальной поверхности, и в зависимости от его массогабаритных параметров, происходит или соскальзывание с вертикальной поверхности, или его опрокидывание (рис. 5).

При определении необходимых мощностей двигателей использовалась та же схема моделирования, что и при определении прижимающих сил. Исключением было то,



Рис. 3. Зависимость величины прижимающей силы от угла поворота передних гусеничных модулей.

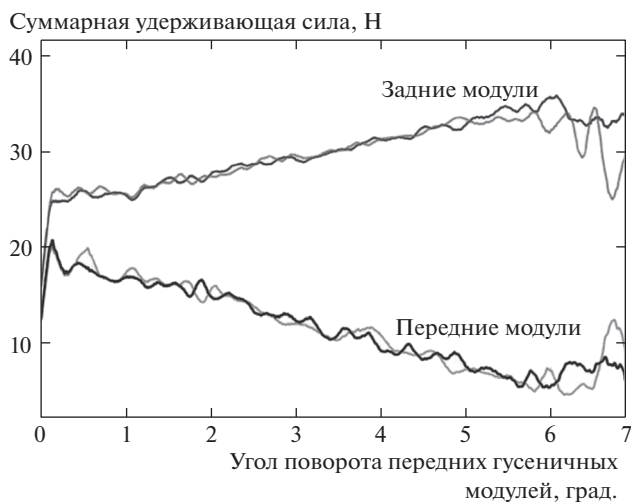


Рис. 4. Зависимость суммарных удерживающих сил на гусеничных модулях от угла поворота передних гусеничных модулей.

что варьируемыми параметрами являлись масса робота и эффективные мощности двигателей (мощность на валу движущего катка).

На рис. 6 показаны зависимости прижимающей силы от эффективной мощности одного двигателя и максимальной скорости движения робота по вертикальной поверхности от эффективной мощности двигателей. Из графика видно, что на значение максимальной прижимающей силы масса робота почти не влияет, но существует связь с эффективной мощностью двигателей. Уменьшение максимальной скорости

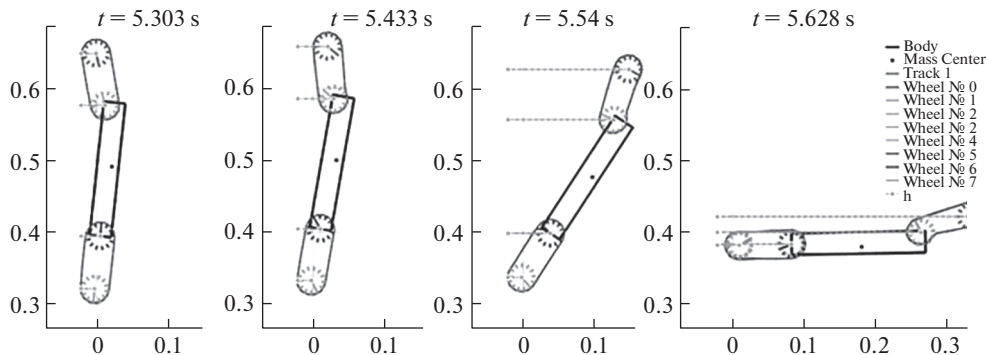


Рис. 5. Момент отсоединения и опрокидывания мобильного робота от вертикальной поверхности.

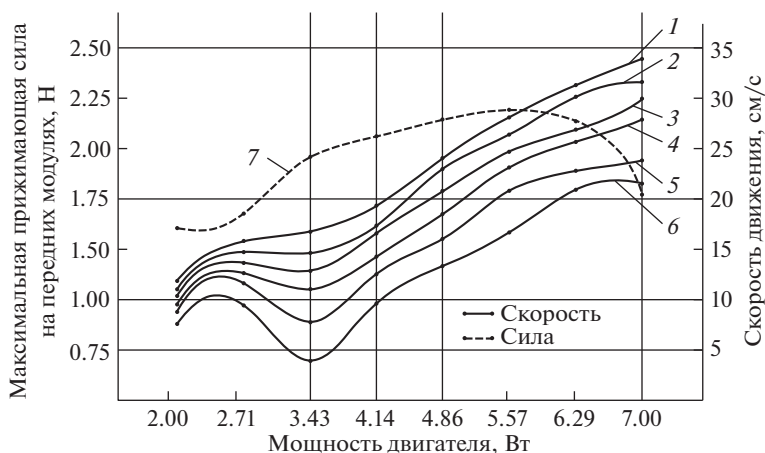


Рис. 6. Зависимость максимальной прижимающей силы на передних модулях и скорости движения мобильного робота от мощности двигателей (1 – график скорости при массе робота $m = 2$ кг; 2 – $m = 2.29$ кг; 3 – $m = 2.57$ кг; 4 – $m = 2.86$ кг; 5 – $m = 3.14$ кг; 6 – $m = 3.43$ кг; 7 – график прижимающей силы).

при мощности двигателя около 3.5 Вт объясняется резонансными явлениями в гусеничных модулях в циклических процессах взаимодействия магнитных траков и ленты. В целом же зависимость максимальной скорости движения робота по вертикальной плоскости носит линейный характер.

Выводы. Предложена гибридная конструкция пассивного механизма перемещения РВП, основанная на магнитно-ленточном принципе. Для расчета характерных ситуаций, возникающих при функционировании такого робота предложенной конструкции, была разработана математическая модель механизма перемещения РВП, учитывающая динамику всех тел, входящих в его состав и их взаимодействие с горизонтальными, наклонными и вертикальными поверхностями посредством упругодиссипативных сил и сил трения.

Было разработано программное обеспечение, автоматизирующее построение и расчет математической модели механизма перемещения. Рассмотренный подход к формированию математических моделей, и его программная реализация позволяет авто-

матерализовать процесс формирования сложных и громоздких систем дифференциальных уравнений, описывающих различные варианты механических структур.

Были проведены серии расчетов, позволяющих обосновать ряд параметров робота при заданных габаритах.

Предложенный механизм и полученные результаты моделирования можно использовать при разработке новых роботов вертикального перемещения для выполнения задач обеспечения антитеррористической безопасности.

Информация о финансовой поддержке. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-29-09596 офи-м).

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gradetsky V.G., Knyazkov M.M.* Wall climbing robots: mechanics, control and adaptation to environment // Proceedings of the 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2014). Smolenice, Slovakia, 2014. P. 7002240.
2. *Nansai S., Mohan R.E.* A survey of wall climbing robots: recent advances and challenges // *Robotics* 5 (3), 2016. P. 5030014.
3. *Dethe R.D., Jaju S.B.* Developments in wall climbing robots: a review // *International Journal of Engineering Research and General Science* 2 (3). 2014. P. 33–42.
4. *Laskar A.H.* Wall climbing robots: the artificial lizards of modern days // *International Journal of Scientific Development and Research* 1 (4). 2016. P. 198–201.
5. *Waalbot: an agile small-scale wall climbing robot utilizing pressure sensitive adhesives / M.P. Murphy, W. Tso, M. Tanzini, M. Sitti* // *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*. Beijing, China, 2006. P. 3411–3416.
6. *Yamamoto A., Nakashima T., Higuchi T.* Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes // *Proceedings of the International Symposium on Micro-Nano-Mechatronics and Human Science (MHS'07)*. Nagoya, Japan, 2007. P. 389–394.
7. *Chen R., Liu R., Shen H.* Design of a double-tracked wall climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism // *Proceedings of the IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*. Tokyo, Japan, 2013. P. 212–217.
8. *Bisht R.S., Alexander S.J.* Mobile robots for periodic maintenance and inspection of civil infrastructure: A Review // *Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms, iNaCoMM*. 2013. P. 1050–1057.
9. *Khirade N.R., Sanghi R.K., Tidke D.J.* Magnetic wall climbing devices – a review // *Proceedings of International Conference of Advances in Engineering and Technology, ICAET-2014*. 2014. P. 55–59.
10. *Fischer W., Tâche F., Siegwart R.* Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles // *Field and Service Robotics / Laugier C., Siegwart R. (Eds.)*. 2007. P. 551–561.
11. *Yoshida Y., Ma S.* A wall-climbing robot without any active suction mechanisms // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2011)*. Phuket, Thailand, 2011. P. 2014–2019.
12. *Laskar A.H.* Wall climbing robots: the artificial lizards of modern days // *International Journal of Scientific Development and Research* 1 (4). 2016. P. 198–201.
13. *A gecko inspired fluid driven climbing robot / J. Liu, Z. Tong, J. Fu, D. Wang, Q. Su, J. Zou* // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*. Shanghai, China, 2011. P. 783–788.
14. *Waalbot II: adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives / M.P. Murphy, C. Kute, Y. Mengüç, M. Sitti* // *The International Journal of Robotics Research*. 2011. Vol. 30(1). P. 118–133.
15. *Sticking in space: manufacturing dry adhesives and testing their performance in space environments / M. Henrey, J.P.D. Têllez, K. Wormnes, L. Pambaguian, C. Menon* // *Proceedings of the 12th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*. Noordwijk, Netherlands, 2013.
16. *Chan B., Balmforth N.J., Hosoi A.E.* Building a better snail: lubrication and adhesive locomotion // *Physics of Fluids*. 2005. Vol. 17(11). P. 113101.
17. *Alkalla M.G., Fanni M.A., Mohamed A.M.* A novel propeller-type climbing robot for vessels inspection // *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Busan, South Korea, 2015. P. 1623–1628.

18. *Provanchen W.R., Jensen-Segal S.I., Fehlberg M.A.* ROCR: an energy-efficient dynamic wall-climbing robot // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2011. Vol. 16(5). P. 897–906.
19. *Xiao J., Sadegh A.* City-Climber: a new generation wall-climbing robots. Climbing and walking robots: towards new applications (ed. H. Zhang), Vienna: InTech, 2007. P. 383–402.
20. *Fischer W., Tâche F., Siegwart R.* Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles // *Field and Service Robotics / Laugier C., Siegwart R. (Eds.)*. 2007. P. 551–561.
21. *Чернуосько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г.* Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: сборник трудов конференции (Москва, 16–19 июня 2014 г.). М., 2014. С. 67–78.
22. *Howlader O.F., Sattar T.P.* Novel adhesion mechanism and design parameters for concrete wall-climbing robot // *Proceedings of the SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*. London, UK, 2015. P. 267–273. doi: 10.1109/IntelliSys. 2015. P. 7361153.
23. *Liu J., Jiang H., Li Z., Hu H.* A small window-cleaning robot for domestic use // *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI'09)*. Shanghai, China. 2009. P. 262–266.
24. *Liu Y., Kim H.G., Seo T.W.* AnyClimb: a new wall-climbing robotic platform for various curvatures // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2016. V. 21(4). P. 1812–2821.
25. *Liu S., Gao X., Li K., Li J., Duan X.* A small-sized wall-climbing robot for anti-terror scout // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2007)*. Sanya, China, 2007. P. 1866–1870.
26. *Zhang Y., Dodd T., Atallah K., Lyne I.* Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot // *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Xian, China, 2010. P. 1393–1398.
27. *Товарнов М.С., Быков Н.В., Власова Н.С.* Математическая модель мобильного робота специального назначения // *Материалы XX юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017)*, 24–31 мая 2017 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2017. С. 327–329.
28. *Быков Н.В., Власова Н.С., Бузлов Н.А.* Разработка механизма перемещения малогабаритного мобильного робота // *Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции*. Санкт-Петербург: ООО “АП4Принт”, 2016. С. 346–348.
29. *Голубев Ю.Ф.* Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2013. № 39. 23 с.