
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.369

ОСОБЕННОСТИ ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ДВИЖИТЕЛЯМИ, ДИСКРЕТНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2021 г. Е. С. Брискин^{1,2,*}, Н. Г. Шаронов^{1,2}¹ *Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*² *Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники Университета Иннополис, Иннополис, Татарстан, Россия*

*e-mail: dtm@vstu.ru

Поступила в редакцию 20.05.2021 г.

Принята к публикации 24.08.2021 г.

Обосновываются особенности тягово-динамического расчета мобильных роботов с движителями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью, вообще, и с шагающими движителями, в частности. Определены конструктивные параметры робота и управляющие воздействия, оказывающие влияние на энергетическую эффективность движения. Рассмотрено применение предложенного метода расчета для оценки тепловых потерь у разработанного робота “Ортоног”. Обобщение полученного результата позволило установить критические скорости движения, обеспечивающие максимальный коэффициент полезного действия роботов с движителями рассмотренных типов.

Ключевые слова: движитель, тяговое усилие, робот, энергоэффективность, коэффициент полезного действия

DOI: 10.31857/S0235711921060043

Одной из основных задач при исследовании и разработке транспортных и технологических машин с колесными и гусеничными движителями является задача о тяговом балансе и тяговой динамике таких транспортных средств [1]. Сущность этой задачи состоит в определении закона поступательного перемещения корпуса транспортного средства с прямолинейным движением его центра масс, а основной целью — подбор двигателя по его мощности, обеспечивающего такое движение. Такая же задача имеет место [2, 3] и для мобильных роботов с теми же типами движителей, характерной особенностью которых является непрерывное взаимодействие движителей, развивающих тяговое усилие, с опорной поверхностью. Однако известен и другой класс мобильных роботов, движители которых дискретно реализуют тяговые свойства. К ним относятся роботы с шагающими движителями [4–6] (рис. 1), роботы, перемещающиеся за счет периодического взаимодействия с наклонной или даже вертикальной поверхностью с помощью присосок [7], электромагнитного взаимодействия с опорной поверхностью, якорно-тросовых и просто тросовых движителей [8] (рис. 2), целенаправленного перемещения внутренних масс в корпусе робота [9], периодического заклинивания рабочего органа на опорной поверхности [10].

Однако во всех этих случаях имеет место не учитываемая и общая для всех особенность, проявляющаяся при “внезапном” начале и окончании “тягового” взаимо-

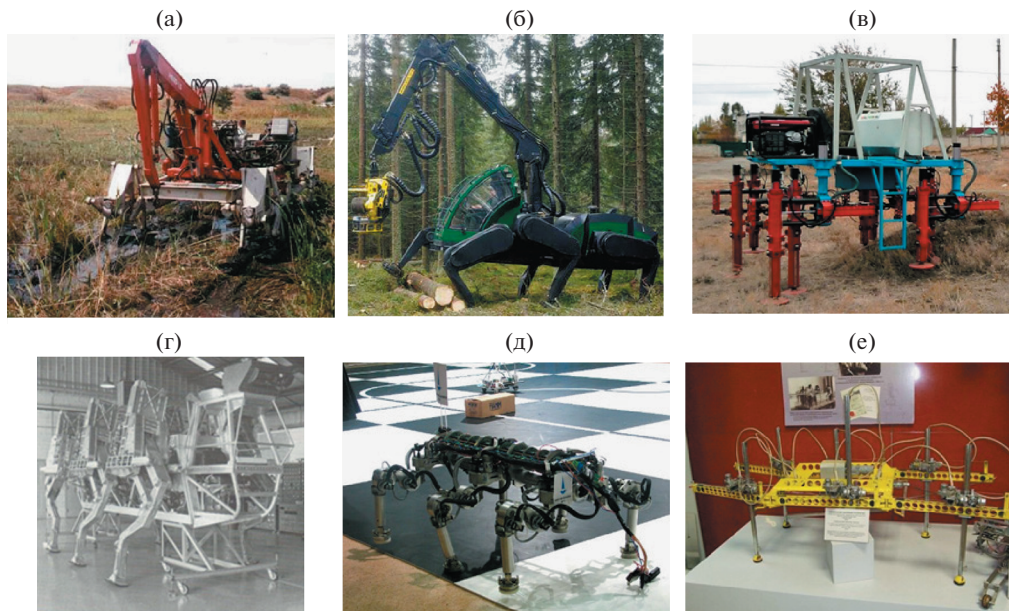


Рис. 1. Многоногие шагающие роботы: (а) – восьминог; (б) – Plustech; (в) – Ортоног; (г) – ASV; (д) – ИМех МГУ; (е) – ИМАШ РАН.

действия движителя с опорной поверхностью, обладающей различными физико-механическими и геометрическими характеристиками.

Другой особенностью, нехарактерной для колесных и гусеничных движителей, являются дополнительные силы инерции, действующие на корпус робота за счет переноса неуравновешенных движителей в новое положение. Эта особенность также может влиять на динамические, энергетические, и другие показатели движения.

Еще одна характеристика шагающих движителей – походка. В одной из первых отечественных работ, обобщающих проблемы создания шагающих роботов [11] обращается внимание на значимость этой характеристики движения, влияющей на распределение реакций опорной поверхности между движителями. Известна достаточно полная классификация походок [12, 13], в которой учитываются геометрические и кинематические характеристики движения. Однако, исследований о влиянии походки на энергетические характеристики программного движения робота недостаточно.

Постановка задачи. Рассматриваются особенности тягово-динамического расчета мобильных роботов с движителями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью с целью установления закономерностей влияния конструктивных параметров робота, управляющих воздействий и характеристик опорной поверхности на энергетическую эффективность движения.

Изучается поступательное движение шагающего робота с N движителями, приводимыми в движение независимыми приводами. При нахождении в фазе взаимодействия с опорной поверхностью опоры всех движителей имеют одинаковую относительную горизонтальную скорость, однако коэффициент режима j -го движителя γ_j [12, 13] при одинаковом общем периоде движения движителя T индивидуален.

Поэтому походка задается временем начала переноса каждого j -го движителя τ_j и временем его окончания τ_j^* . Время окончания переноса τ_j^* одновременно является

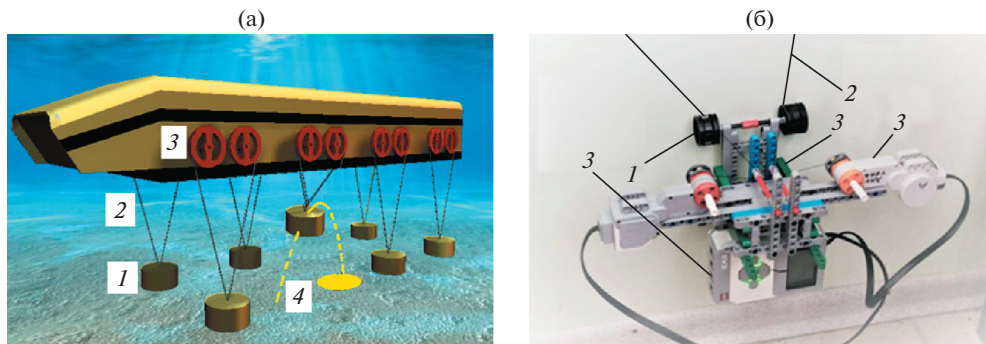


Рис. 2. Разрабатываемые шагающие роботы с тросовыми двигателями: (а) – подводный робот; (б) – робот, перемещающийся по вертикальной поверхности; 1 – опора, 2 – трос, 3 – корпус, 4 – траектория шагания.

временем начала взаимодействия с грунтом. Например, для четырехдвигательного робота с восемью механизмами шагания ее удобно представить в виде диаграммы (рис. 3), отличие которой от известных [13, 14] состоит в различном времени нахождения каждого механизма шагания в опорной фазе или фазе переноса, например, робота “Ортоног” (рис. 1), двигатели которого образуют двоянные механизмы шагания.

Между параметрами походки τ_j^* , τ_j , γ_j , T имеется связь

$$\tau_j^* - \tau_j = \begin{cases} T(1 - \gamma_j), & \text{если } \tau_j^* > \tau_j, \\ -T\gamma_j, & \text{если } \tau_j^* < \tau_j. \end{cases} \quad (1)$$

Если расположить все τ_j , τ_j^* в порядке возрастания $\bar{\tau}_1 < \bar{\tau}_2 \dots < T$, то на каждом интервале реализуется свой режим работы двигателей.

Различное время двигатели находятся и в фазе взаимодействия с опорной поверхностью. В этом состоит одно из отличий формулируемой задачи от известных подходов при исследовании [5, 13, 16], например, шагающих роботов, приводящее к тому, что двигатели имеют различную длину шага.

Допускается, что нагрузку Q , равную силе сопротивления движению [14], на все двигатели можно распределить по произвольному закону, что обеспечивается системой управления и ограничивается только физико-механическими свойствами взаимодействующих поверхностей.

Распределение средних усилий $\bar{F}_j$, развиваемых двигателем каждого двигателя учитывается коэффициентами χ_j

$$\bar{F}_j = Q\chi_j, \quad \sum \chi_j = 1, \quad j = 1, 2 \dots N_*, \quad (2)$$

где N_* – количество двигателей вместе с j -м двигателем в момент времени t находящийся в тяговом режиме.

Если нагрузка распределяется равномерно и не учитывается время переходного процесса от начала взаимодействия, когда $F_j = 0$, до его окончания, когда устанавливается требуемое тяговое усилие, то для рассматриваемого четырехдвигательного робота с восемью механизмами шагания на каждом из одиннадцати этапах диаграмма нагрузок (рис. 3) представлена в форме зависимости тяговых усилий для каждого из механизмов шагания (на диаграмме показано только для первого) при рассмотренном частном случае управления приводами курсового движения.

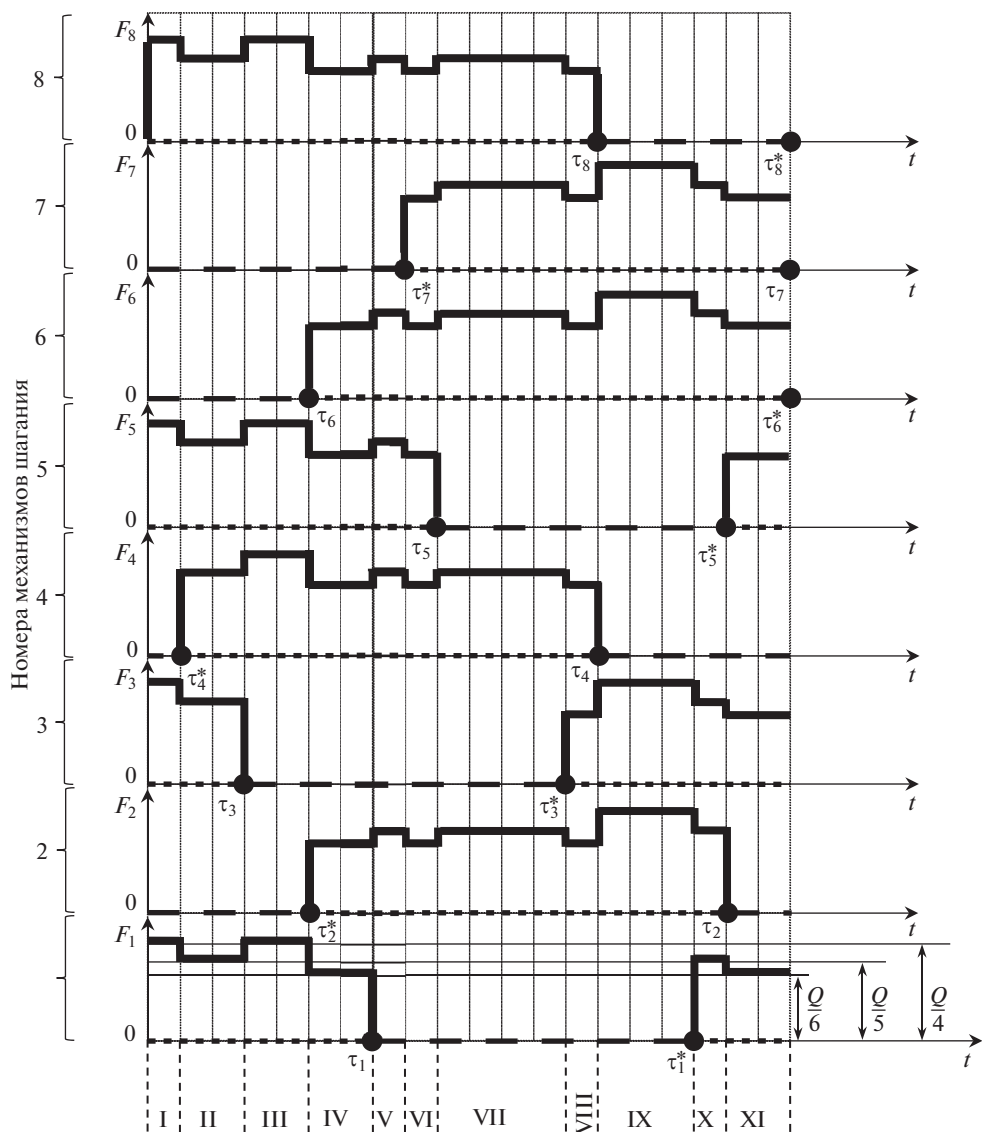


Рис. 3. Диаграмма походки и распределения усилий между движителями: I–XI – фазы одинакового состояния движителей, точечная линия – фаза реализации тягового усилия, пунктирная горизонтальная линия – фаза переноса, сплошная линия – уровень тягового усилия.

В общем случае диаграммы тяговых усилий могут иметь и другой вид, отличающийся количеством и продолжительностью характерных этапов. Это зависит от количества движителей и принципов, закладываемых в систему управления по реализации походки и тяговых усилий.

Известно, что при внезапно приложенной нагрузке [15], а именно так следует рассматривать начало взаимодействия движителей с опорной поверхностью, усилие F_j зависит от упругих и диссипативных свойств, взаимодействующих тел (рис. 4).

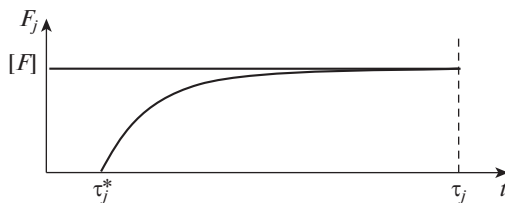


Рис. 4. Зависимость усилия взаимодействия двигателя с опорной поверхностью от времени при линейно-вязкой реологической модели опорной среды.

Аналитически представленную на графике (рис. 3) закономерность можно представить в форме

$$F_j = F_{j0}(1 - e^{-\mu t}), \quad F_j \leq [F], \quad (3)$$

где тяговое усилие двигателя по двигателю F_{j0} и коэффициент μ характеризуют модель взаимодействия; $[F]$ — допустимое значение F_j , обусловленное сцеплением двигателя с поверхностью. Причем следует иметь в виду, что F_j не может превышать допустимого значения $[F]$.

Что касается переносимых движителей, то в силу неуравновешенности, уравнения их перемещения в новое положение будут оказывать влияние на энергетические характеристики, комфортабельность и устойчивость движения [14]. Однако среднее значение каждой из сил инерции без учета сил трения в механизмах шагающих движителей равно нулю. Это дает возможность применения тех или иных рекуператоров, запасующих энергию в фазе торможения движения движителя и отдающих в фазе разгона [5].

Поэтому при переносе движителей в новое положение тягово-динамический расчет может предполагать учет только энергетических потерь за счет сил трения, в первую очередь обусловленных конструкционным демпфированием. Приближенную оценку таких энергозатрат A^* можно осуществить, если рассматривать движение движителя в фазе переноса как движение на полупериоде гармонических колебаний тела массы m под действием внешней силы. Известно [15], что в этом случае $A^* = 0.5\pi r \omega a^2$, где r — эквивалентный коэффициент вязкого сопротивления; ω , a — соответственно частота и амплитуда колебаний. Для шагающего движителя приближенная оценка имеет вид

$$A^* = \frac{1}{2} r \pi^2 \frac{\gamma_j}{1 - \gamma_j} V L_j = \frac{1}{2} r \pi^2 \frac{\gamma_j^2}{1 - \gamma_j} V^2 T = \xi \frac{\pi^2 m \gamma_j^2}{(1 - \gamma_j)^2} V^2, \quad (4)$$

где V — скорость движения робота; L_j — длина шага движителя; ξ — коэффициент демпфирования; m — приведенная к стопе масса движителя.

Целью решения рассматриваемой задачи является установление закономерностей влияния конструктивных (длина шага, количество движителей и др.), управляющих (скорость, коэффициент режима, распределение нагрузки между движителем, расписание походки), а также параметров опорной поверхности (жесткость, вязкость) на энергоэффективность движения мобильного робота.

Метод решения. Характеристики опорной поверхности являются основой для оценки тягового усилия по сцеплению, развиваемого движителями. Результатом является

оценка в (3) параметров μ , $[F]$. Если на этапе контакта с опорной поверхностью сила взаимодействия определяется уравнением (3), то

$$\bar{F}_j = \frac{1}{\gamma_j T} \int_0^{\gamma_j T} F_{j0}(1 - e^{-\mu t}) dt = F_{j0} \psi_1(V, L_j, \mu), \quad (5)$$

$$\text{где } \psi_1(V, L_j, \mu) = 1 - \frac{V}{L_j \mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu L_j}{V}} \right) = 1 - \xi(1 - e^{-\xi}), \quad \xi = \frac{V}{L_j \mu}.$$

Если в (5) μ достаточно велико, что означает быстрое завершение переходных процессов, то $\bar{F}_j = F_{j0}$.

Окружающая среда оказывает и сопротивление движению. При взаимодействии движителей с твердой деформируемой поверхностью силы сопротивления обусловлены ее деформацией. Для шагающих движителей средняя сила сопротивления определяется выражением [14]

$$Q = \sum_{j=1}^N \frac{P_j^2}{2c_n L}, \quad (6)$$

где P_j — нормальная сила взаимодействия движителя с опорной поверхностью; c_n — нормальная жесткость системы “опорная поверхность—стопа движителя”.

Как следует из (5) для определения средней величины тяговой силы взаимодействия движителя с опорной поверхностью требуется задание конструктивных, допускающих регулирование параметров: L_j , T , γ_j , которые связаны между собой соотношением

$$\gamma_j T = \frac{L_j}{V}. \quad (7)$$

К управляющим параметрам относится и задание коэффициентов χ_j (2), характеризующих распределение тяговых усилий по двигателю между движителями. Однако для этого необходимо задать расписание походки τ_j^* , τ_j (1) и расположить их в порядке возрастания $\bar{\tau}_1$, $\bar{\tau}_2$, ..., $\bar{\tau}_N$.

Сопоставление (2) с (5) определяет приведенные к тяговому звену усилия F_{j0} , которые должны развивать двигатели соответствующих движителей

$$F_{j0} = \frac{Q \chi_j}{\psi_1(V, L_j, \mu)} = \frac{Q \chi_j}{\psi_1(\xi)}. \quad (8)$$

В наиболее простом случае, если тяговые усилия предполагается распределить равномерно между движителями, а переходные процессы не учитывать, то $\chi_j = 1/N$, $\psi_1 = 1$

$$F_{j0} = Q/N. \quad (9)$$

Среди показателей, характеризующих эффективность реализуемого режима движения, принимаются во внимание:

1) уровень тепловых потерь A , который для различных типов двигателей различным образом зависит от развиваемого момента, пропорционального тяговому усилию F_j . Так для электрических двигателей [17]

$$A = \int_0^T (\beta_{j2} F_j^2 + \beta_{j1} F_j + \beta_{j0}) dt, \quad (10)$$

где β_{jk} — постоянные коэффициенты;

2) средняя сила, развиваемая j -м приводом за весь цикл $\bar{F}_j^*$ и среднее отклонение I квадрата тяговых усилий от силы сопротивления движения

$$\bar{F}_j = \frac{1}{T} \int_0^T F_j(t) dt, \quad I = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \int_0^T \left(F_j - \frac{Q}{N} \right)^2 dt. \quad (11)$$

Однако к потерям (10), обусловленных реализацией тягового усилия, следует присоединить потери при переносе движителей в новое положение (4).

Оценка тягово-динамических характеристик шагающего робота “Ортоног”. Для оценки показателей (10), (11) при заданной походке (рис. 2), учитывается масса одинаковых переносимых механизмов шагания $m = 55$ кг, постоянная скорость поступательного движения V , максимальная длина шага $L_{\max} = 0.455$ м и сила сопротивления движению Q , зависящая как от конструктивных параметров робота, так и от физико-механических свойств поверхности. Приводные электрические двигатели всех механизмов шагания одинаковые, а в (10) принимается $\beta_{j1} = \beta_{j0} = 0$, $\beta_{j2} = \beta$. Так как рекуперация энергии не предусмотрена, то при исследовании переноса механизма шагания в новое положение можно воспользоваться результатами исследований перемещения движителя из одного положения в другое за заданное время τ с нулевой начальной и конечной скоростями [14]. Уровень тепловых потерь A^* в приводе переноса движителя пропорционален его массе m , коэффициенту режима γ_j , квадрату скорости V

$$A_j^* = k_j \gamma_j^2 V^2 m, \quad (12)$$

где k_j — коэффициент пропорциональности, зависящий от характера движения при переносе. Под характером движения понимается условные этапы ускоренного, замедленного и равномерного движения. Для шагающего робота “Ортоног”

$$k_j = \frac{4(1 + \gamma_j)\gamma_j}{(1 - \gamma_j)^3}, \quad A_j^* = \frac{4\gamma_j^3(1 + \gamma_j)}{(1 - \gamma_j)^3} m V^2. \quad (13)$$

Отличие оценки (13) при отсутствии рекуперации энергии от (4) при ее наличии состоит в коэффициентах при mV^2 . Из сравнения (13) и (4) также ясно, что с энергетической точки зрения использовать явление рекуперации следует в тех случаях, когда, коэффициент демпфирования ξ , обусловленный потерями в сочленениях и материале конструкции рекуператора, удовлетворяет неравенству

$$\xi_j < \frac{4\gamma_j(1 + \gamma_j)}{(1 - \gamma_j)\pi^2}. \quad (14)$$

В табл. 1 при заданной походке представлены значения коэффициентов режима γ всех механизмов шагания и тепловые потери в фазе контакта с опорной поверхностью A_j , в фазе переноса A_j^* и их суммарное значение.

Для шагающей машины “Ортоног” помимо базового варианта организации движения рассмотрено два измененных режима. В первом случае увеличен коэффициент режима 1 механизма шагания с 0.5 до 0.55, а во втором уменьшен коэффициент режима 4 механизма шагания с 0.65 до 0.6. В табл. 1 эти изменения выделены. Тогда суммарные оценки тепловых потерь базового варианта $\bar{A}_0$ и измененных режимов $\bar{A}_1$ и $\bar{A}_2$

$$\begin{aligned} \bar{A}_0 &= 4.167\beta Q^2 + 402.4mV^2, \\ \bar{A}_1 &= 4.22\beta Q^2 + 391.9mV^2, \\ \bar{A}_2 &= 4.105\beta Q^2 + 409.04mV^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Таблица 1. Распределение нагрузки $\bar{F}_j$ на движители в соответствии с диаграммой рис. 3

№	Базовый			Изменение 1			Изменение 2		
	γ	A_j	A_j^*	γ	A_j	A_j^*	γ	A_j	A_j^*
1	0.50	$0.443\beta Q^2$	$4.5mV^2$	0.50	$0.443\beta Q^2$	$4.5mV^2$	0.55	$0.471\beta Q^2$	$11.32mV^2$
2	0.65	$0.539\beta Q^2$	$42.25mV^2$	0.65	$0.551\beta Q^2$	$42.25mV^2$	0.65	$0.4985\beta Q^2$	$42.25mV^2$
3	0.50	$0.478\beta Q^2$	$4.5mV^2$	0.50	$0.512\beta Q^2$	$4.5mV^2$	0.50	$0.478\beta Q^2$	$4.5mV^2$
4	0.65	$0.5161\beta Q^2$	$42.25mV^2$	0.60	$0.488\beta Q^2$	$21.6mV^2$	0.65	$0.504\beta Q^2$	$42.25mV^2$
5	0.55	$0.4708\beta Q^2$	$11.32mV^2$	0.55	$0.4708\beta Q^2$	$21.6mV^2$	0.55	$0.458\beta Q^2$	$11.32mV^2$
6	0.75	$0.6185\beta Q^2$	$189.4mV^2$	0.75	$0.631\beta Q^2$	$189.4mV^2$	0.75	$0.606\beta Q^2$	$189.4mV^2$
7	0.60	$0.523\beta Q^2$	$21.6mV^2$	0.60	$0.535\beta Q^2$	$21.6mV^2$	0.60	$0.523\beta Q^2$	$21.6mV^2$
8	0.7	$0.579\beta Q^2$	$86.4mV^2$	0.70	$0.591\beta Q^2$	$86.4mV^2$	0.70	$0.5665\beta Q^2$	$86.4mV^2$
Итого		$4.167\beta Q^2$	$402.4mV^2$		$4.22\beta Q^2$	$391.9mV^2$		$4.105\beta Q^2$	$409.04mV^2$

Полученные оценки (15) позволяют оценить и походы, которые обеспечивают преимущества базовой от измененной в первом и втором вариантах. Соответственно в первом случае и во втором случае базовая походка имеет преимущество при

$$V_1 < 0.07\sqrt{\frac{\beta Q^2}{m}}, \quad V_2 > 0.095\sqrt{\frac{\beta Q^2}{m}}. \quad (16)$$

Обобщенный анализ энергоэффективности мобильных роботов с шагающими и “шагающеподобными” движителями. В общем случае уровень тепловых потерь в двигателях шагающих движителей складывается из потерь A в фазе взаимодействия с грунтом и в фазе переноса A^*

$$A_n = B_n\beta Q^2, \quad A_n^* = C_nmV^2, \quad (17)$$

где B_n и C_n — функции, зависящие от конструктивных параметров L_j , N_* , ξ , управляющих параметров V , γ_j , χ_j , τ_j , τ_j^* , свойств опорной поверхности $[F]$, μ . Таким образом, для каждого n -го набора параметров потери энергии определяются суммой

$$\bar{A}_n = A_n + A_n^* = B_n\beta Q^2 + C_nmV^2. \quad (18)$$

Такая оценка потерь позволяет их сравнивать, а при одинаковых силах сопротивления движению определять диапазон скоростей, в которых какая-либо имеет преимущество. Если сравниваются n и k режимы движения, то n -й будет иметь преимущество перед k -м если $\bar{A}_n < \bar{A}_k$. Это условие приводит к неравенству

$$V^2 < \frac{\beta(B_k - B_n)}{m(C_n - C_k)}. \quad (19)$$

Анализ энергоэффективности мобильных роботов удобно представить и в геометрической форме (рис. 5).

Режим движения 2 при любых скоростях движения по энергоэффективности уступает базовому. Режим 3 уступает базовому при $V^2 < V_1^2$. При скоростях $V^2 < V_2^2$ базовый режим по энергоэффективности превосходит четвертый, а пятый режим при всех скоростях лучше базового.

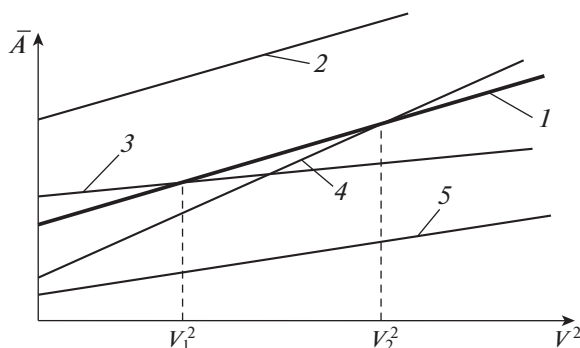


Рис. 5. Геометрическая диаграмма энергоэффективности: 1 – базовый режим движения; 2, 3, 4, 5 – сравниваемые режимы движения.

Анализ (17) совместно с (10), (13), (14) также показывает, что рост коэффициента режима γ у какого-либо движителя приводит к уменьшению коэффициента B_n нового n режима движения, но к увеличению C_n по сравнению с базовым.

Поэтому при изменении скорости движения мобильного робота с целью снижения уровня тепловых потерь следует изменять и режим движения, например, переходить с базового режима 1 на режим 3, представленных на диаграмме энергоэффективности (рис. 5).

Для оценки коэффициента полезного действия (КПД) η движителей, движение которых рассматривается при выбранном режиме, следует иметь в виду, что уровень тепловых потерь оценивался на перемещении робота S , за один период

$$S = VT. \quad (20)$$

Под полезной работой A_u понимается работа по перемещению робота по горизонтальной поверхности на расстояние S с преодолением силы сопротивления Q

$$A_u = QVT, \quad (21)$$

поэтому

$$\eta = \frac{A_u}{A_u + \bar{A}} = \frac{QVT}{QVT + B_n \beta Q^2 + C_n m V^2}. \quad (22)$$

Полученный результат позволяет определить скорость V движения робота, при которой КПД движителей η максимален

$$\begin{cases} V_* = \sqrt{\frac{\beta B_n}{m C_n}}, \\ \eta = \frac{T}{T + 2\sqrt{m \beta C_n B_n}}. \end{cases} \quad (23)$$

Выводы. 1. Предложен метод энергетической оценки режимов движения движителей мобильных роботов, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью. **2.** Установлено влияние конструктивных и управляющих параметров роботов и их механизмов шагания, а также физико-механических свойств опорной поверхности на уровень тепловых потерь в приводных двигателях движителей. **3.** Сформулирована основа метода управления режимами движения шагающих роботов обеспечивающего снижение уровня тепловых потерь в приводных двигателях при изменении скорости

движения. 4. Установлена критическая скорость движения мобильного робота, обеспечивающая максимальный КПД приводов движителей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Теория автомобиля. М.: МГИУ, 2008. 18 с.
2. Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы — навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2 (175). С. 48.
3. Мартыненко Ю.Г., Формальский А.М. О движении мобильного робота с роликонесящими колесами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. № 6. С. 142.
4. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2013. 32 с.
5. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 199 с.
6. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Экстремальные локомоторные возможности инсектоморфных роботов. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2018. 212 с.
7. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.
8. Брискин Е.С., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Пеньшин И.С. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 2 (19). С. 39.
9. Черноусько Ф.Л. Движение тела по плоскости под влиянием подвижных внутренних масс // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 4. С. 406.
10. Parker R., Bayne K., Clinton P. Robotics in forestry // New Zealand Journal of Forestry. 2016. № 60 (4). С. 8.
11. Артоболевский И.И., Умнов Н.В. Некоторые проблемы создания шагающих машин // Вестн. АН СССР. 1969. № 2. С. 44.
12. Бессонов А.П., Умнов Н.В. К вопросу о систематике походок шагающих машин // Машиноведение. 1975. № 6. С. 23.
13. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Физматлит, 1984. 312 с.
14. Брискин Е.С. Об общей динамике и повороте шагающих машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 6. С. 33.
15. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. 4-е изд., Л.: Политехника, 1990. 271 с.
16. Иванов А.В., Формальский А.М. Математическое моделирование ходьбы человека с костылями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 2. С. 155.
17. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Л.: Энергия, 1972. Ч. 1. 543 с. Ч. 2. 648 с.