

УДК 531.8

© 1993 г. В. В. ЛАПШИН

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЗАТРАТ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА

Проблемы энергетической эффективности аппаратов, передвигающихся с помощью ног, в значительной степени определяют перспективы использования этого нового класса транспортных средств для решения практических задач¹. Наряду с экспериментальными исследованиями энергетике движения макетов шагающих аппаратов и вычислительными экспериментами с достаточно сложными и полными математическими моделями динамики движения шагающих аппаратов целесообразно иметь простые модельные оценки. Такие модельные оценки ранее строились при исследовании энергетике движения человека и животных [1, 2], энергетике динамических режимов движения двуногих аппаратов² [3, 4] и энергетике движения статически устойчивых шагающих аппаратов^{3, 4} [5]. В данной работе рассмотрены только модельные оценки энергозатрат на передвижение статически устойчивых шагающих аппаратов и их сравнение с результатами исследований энергозатрат различных транспортных средств (в том числе шагающих машин) и животных⁵ [6, 7]. При этом рассматривается равномерное и прямолинейное движение аппарата и предполагается, что энергозатраты в основном связаны с поддержанием веса аппарата, созданием полезной тяги и обеспечением колебательного движения ног относительно корпуса (вперед-назад). Не учитываются энергозатраты на подъем и опускание ног и на деформацию грунта. Энергозатраты на преодоление трения в сочленениях ног, потери энергии в приводах в степенях подвижности ног и в энергоустановке могут быть учтены через КПД. Рассмотрены пути уменьшения энергозатрат шагающих аппаратов.

1. Параметры аппарата и походки. Рассмотрим плоское движение n -ногого шагающего аппарата по горизонтальной поверхности. Корпус аппарата движется равномерно и прямолинейно параллельно горизонтальной опорной поверхности со скоростью V . Клиренс или расстояние по вертикали от опорной поверхности до точек подвеса ног к корпусу равно H . Аппарат движется периодической волновой походкой [8]. Все ноги совершают относительно корпуса одинаковое периодическое движение со сдвигом по фазе (по времени). Обозначим через T_0 продолжительность фазы опоры на ногу, T_1 продолжительность фазы переноса ноги. Тогда $T = T_0 + T_1$ является периодом движения аппарата. Длина шага относительно корпуса (расстояние, проходимое стопой относительно корпуса в течение опорной фазы) равна $S = VT_0$. Длина шага на местности (расстояние между двумя последовательными точками постановки ног на опорную поверхность) $S = VT$. Максимальную длину ноги (длину полностью распрямленной ноги) обозначим L . Обозначим массу аппарата через M , ускорение силы тяжести g . Пусть аппарат должен развивать силу тяги Φ (горизонтальная сила сопротивления движению аппарата). При рассмотрении энергозатрат, связанных с движением

¹ Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Кирильченко А. А., Лапшин В. В. Шагающие машины. М., 1989. 36 с. (Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР. N 87).

² Болотин Ю. В. Энергетически оптимальные походки в модельной задаче управления двуногим шагающим аппаратом. М., 1982. 28 с. (Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР. N 202).

³ Умнов Н. В. Теория и методы построения рациональных движителей многоногих шагающих машин. — Докторс. дис., М.: Ин-т машиноведения АН СССР, 1981. 500 с.

⁴ Гончаров С. И., Умнов Н. В. Метод оценки предельной скорости шагающих роботов, перемещающихся в режиме ходьбы. // Тез. докл. 4-го Всесоюз. совещания по робототехническим системам. Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1987. Ч. 2, С. 211—212.

⁵ Лапшин В. В. Проблемы динамики и управления движением аппаратов, перемещающихся с помощью конечностей. — Докторс. дис. М.: Ин-т прикл. матем. АН СССР, 1987. 345 с.

ног относительно корпуса, будем считать, что приведенная к стопе масса ноги постоянна и равна m .

Исследование энергетики движения шагающего аппарата целесообразно вести в безразмерном виде. Для этого введем следующие безразмерные величины: $\mu = nm/M$ — относительная суммарная масса ног (доля ног в массе аппарата); $\beta = T_0/T$ — характеристика режима походки [8] или относительная продолжительность фазы опоры; $v = V/(gL)^{1/2}$ — безразмерная скорость движения; $s = S/L$ — безразмерная длина шага; $s_A = S_A/L = s/\beta$ — безразмерная длина шага в абсолютном пространстве, $h = H/L$ — безразмерный клиренс; $\varphi = \Phi/(Mg)$ — коэффициент тяги аппарата.

2. Энергозатраты на передвижение шагающего аппарата. При определении энергозатрат аппарата не будем учитывать потери на трение в сочленениях ног, потери энергии в двигателях в степенях подвижности ног, энергозатраты на деформацию грунта.

Обозначим через W_{ij} мощность в j -м шарнире i -й ноги. Тогда, если тяга $\Phi = 0$, то энергозатраты на передвижение аппарата за период

$$\int_0^T \sum_j W_{ij} dt = 0$$

Привода в степенях подвижности ног развивают в течение периода как положительную, так и отрицательную мощность, т. е. выделяют энергию в режиме разгона и поглощают энергию в режиме торможения. При оценке энергозатрат аппарата предположим, что рекуперации энергии нет и энергозатраты на передвижение аппарата равны

$$E = \int_0^T \sum_j W_{ij}^+ dt$$

где $W_{ij}^+ = W_{ij}$ при $W_{ij} > 0$, $W_{ij}^+ = 0$ при $W_{ij} \leq 0$.

В рассматриваемом нами случае энергозатраты на передвижение аппарата можно разделить на три составляющие: E_m — энергозатраты на поддержание веса аппарата, E_φ — энергозатраты на создание силы тяги, E_L — энергозатраты на обеспечение колебательного движения ног относительно корпуса.

Дадим оценки этих энергозатрат в предположении, что они независимы. Отметим, что не для всякой кинематики ног это верно. Вычисляя эти энергозатраты, в каждый момент времени разделяем мощность в j -м шарнире i -й ноги на три составляющие $W_{ij} = W_{ij}^m + W_{ij}^\varphi + W_{ij}^L$ и вычисляем

$$E_m = \int_0^T \sum_j W_{ij}^m dt, \quad E_\varphi = \int_0^T \sum_j W_{ij}^\varphi dt, \quad E_L = \int_0^T \sum_j W_{ij}^L dt$$

Возможны случаи, когда W_{ij}^m , W_{ij}^φ , W_{ij}^L не все имеют одинаковый знак и тогда $E \neq E_m + E_\varphi + E_L$. Справедливо неравенство $E \leq E_m + E_\varphi + E_L$ в силу свойства неравенств $|a + b| \leq |a| + |b|$. Таким образом в данной работе берется оценка сверху энергозатрат шагающего аппарата $E = E_m + E_\varphi + E_L$.

В качестве безразмерной величины, характеризующей энергетику движения аппарата, рассмотрим удельные энергозатраты на единицу пути и единицу веса аппарата

$$\epsilon = E/(MgS_A) \quad (1)$$

которые в русской литературе называют также «коэффициент сопротивления движению» [3], а в английской литературе «specific resistance» [6, 7].

3. Энергозатраты на обеспечение движения ног относительно корпуса. При определении энергозатрат на обеспечение движения ног относительно корпуса

рассмотрим только энергозатраты, связанные с обеспечением движения ног в продольном направлении. Энергозатраты на подъем и опускание ног не будем рассматривать, так как амплитуда колебаний ног в вертикальном направлении при движении по простой местности существенно меньше, чем амплитуда колебаний ног в продольном направлении.

В опорной фазе стопа движется относительно корпуса равномерно и прямолинейно в направлении, противоположном движению аппарата, т. е. со скоростью $-V$.

Фазу переноса ноги можно разделить на четыре этапа: 1) торможение стопы относительно корпуса от скорости $-V$ до нуля, 2) разгон стопы до максимальной скорости V_B^\wedge относительно корпуса, 3) торможение стопы до нулевой скорости, 4) разгон стопы до скорости $-V$.

В силу того, что приведенная к стопе масса ноги постоянна и потенциальная энергия ноги не изменяется (нога не поднимается), энергозатраты связаны только с изменением кинетической энергии стопы.

В фазе опоры кинетическая энергия стопы постоянна и равна $mV^2/2$, а энергозатраты равны нулю. На 1-м этапе фазы переноса нога тормозится и выделяется запасенная кинетическая энергия $E_{1i} = -mV^2/2$, на 2-м этапе нога разгоняется и энергозатраты равны $E_{2i} = mV_B^{\wedge 2}/2$, на 3-м этапе нога тормозится и выделяется энергия $E_{3i} = -mV_B^{\wedge 2}/2$, на 4-м этапе энергозатраты $E_{4i} = mV^2/2$. Причем $E_{1i} + E_{2i} + E_{3i} + E_{4i} = 0$.

Положительная работа, совершаемая при обеспечении движения i -й ноги относительно корпуса в течение периода движения T , равна $E_{Li} = E_{2i} + E_{4i} = m(V^2 + V_B^{\wedge 2})/2$. Энергозатраты на движение всех ног равны $E_L = \sum E_{Li}$ или в безразмерном виде

$$\epsilon_L = E_L / (MgS_A) = \mu v \beta (1 + V_B^{\wedge 2} / V^2) / (2s)$$

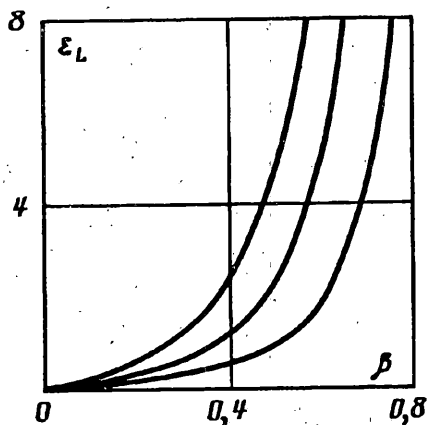
Входящее в эту формулу отношение V_B^\wedge / V зависит от способа организации движения переноса ноги.

Рассмотрим движение стопы при переносе ноги в абсолютном пространстве. В фазе переноса стопа перемещается на расстояние $S_A = s/\beta$ и скорость стопы в абсолютном пространстве $V_A = V + V_B$, где V_B — скорость стопы относительно корпуса. Обозначим через $\langle V_A \rangle$ среднюю скорость стопы в абсолютном пространстве при переносе ноги $\langle V_A \rangle = S_A / T$, а через V_A^\wedge максимальную скорость стопы в абсолютном пространстве. Обозначим через $k_v = V_A^\wedge / \langle V_A \rangle$ отношение максимальной скорости стопы в абсолютном пространстве к ее среднему значению. Величина k_v определяется способом разгона и торможения ног. Минимальное значение $k_v = 1$ соответствует мгновенному разгону и торможению ног. Если ускорения стопы являются кусочно-постоянными функциями времени (половину фазы переноса стопа разгоняется с постоянным ускорением, и половину фазы переноса тормозится с тем же ускорением), то $k_v = 2$. Если ускорения стоп являются кусочно-линейными функциями времени, то $k_v = 1,5$. Тогда $V_B^\wedge / V = k_v / (1 - \beta) - 1$, а удельные энергозатраты на обеспечение движения ног относительно корпуса

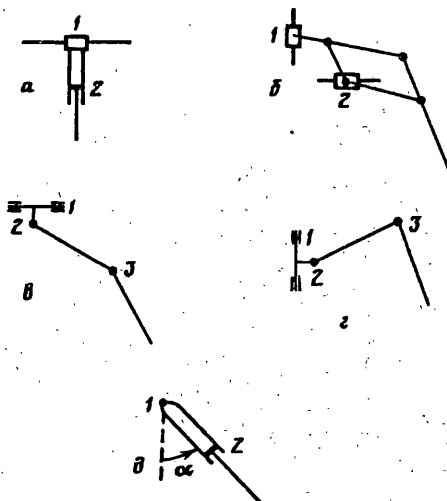
$$\epsilon_L = \mu v \beta [1 + (k_v / (1 - \beta) - 1)^2] / (2s) \quad (2)$$

Энергетически наиболее выгодно использовать минимальные значения k_v и β . На фиг. 1 приведена зависимость $\epsilon_L / [\mu v^2 / (2s)]$ от β при различных значениях k_v (кривая 1 — $k_v = 1$, кривая 2 — $k_v = 1,5$, кривая 3 — $k_v = 2$). Значения обоих этих параметров существенно влияют на величину энергозатрат ϵ_L .

Минимальная величина характеристики режима β для статически устойчивого движения шагающего аппарата зависит от числа ног. Для четырехного аппарата $\beta \geq 0,75$ ($\beta = 0,75$ соответствует походке, при которой в каждый момент времени



Фиг. 1



Фиг. 2

одна нога переносится), для шестиногого аппарата $\beta \geq 0,5$ ($\beta = 0,5$ соответствует походке, при которой в каждый момент времени три ноги находятся в фазе опоры, а три ноги переносятся). Для n -го аппарата $\beta \geq 3/n$ [8].⁶⁷⁸⁹

Энергетически оптимальным по величине ϵ_L является наиболее динамичный режим движения, при котором в каждый момент времени в фазе опоры находится минимально необходимое для обеспечения статической устойчивости количество ног, равное трем. Оптимальное в смысле способа переноса ног значение удельных энергозатрат на обеспечение движения ног соответствует импульсному разгону и торможению ног. Если есть ограничения на величину ускорений стоп, то энергетически наиболее выгодным является разгон стопы с максимальным ускорением, затем движение стопы с постоянной максимальной скоростью и торможение с максимальным ускорением.

Отметим также резкий (пропорционально квадрату скорости) рост удельных энергозатрат на обеспечение движения ног с ростом скорости движения аппарата. Этот эффект отмечен также в ⁶⁻⁹ [1-5, 7].

Значение ϵ_L для n -го аппарата при оптимальных значениях $k_v = 1$, $\beta = 3/n$ обозначим ϵ_L^* :

$$\epsilon_L^* = 3\mu v^2 [1 + 9/(n-3)^2] / (2sn) \quad (3)$$

5. Энергозатраты на поддержание веса аппарата. Энергозатраты на поддержание веса аппарата зависят от кинематики ноги. Ряд кинематических схем ног аппарата обеспечивает поддержание веса не за счет двигателей, а за счет нагрузки на конструкцию. К их числу относится ортогональная кинематика ноги. Такая нога (фиг. 2, а) состоит из закрепленной на корпусе горизонтальной направляющей, по которой перемещается каретка с вертикально расположенным на ней звеном ноги. Вертикальное звено можно поднимать и опускать с помощью привода, расположенного на каретке. При движении аппарата в опорной фазе положение вертикального звена не изменяется, оно фиксируется тормозом. Поэтому энергозатраты на поддержание веса аппарата равны нулю $E_m = 0$, а соответственно и удельные энергозатраты также равны нулю

$$\epsilon_m = 0 \quad (4)$$

⁶ Болотин Ю. В. См. указ. публ., с. 73.

⁷ Умнов Н. В. См. указ. публ., с. 73.

⁸ Гончаров С. И., Умнов Н. В. См. указ. публ., с. 73.

⁹ Лапшин В. В. См. указ. публ., с. 73.

Поддержание веса аппарата за счет нагрузки на конструкцию (т. е. с нулевыми энергозатратами) обеспечивают также и другие кинематические схемы ног (ряд из них использован в созданных конструкциях шагающих аппаратов): ноги на основе пантографных механизмов [7, 9, 10], ноги, последнее звено которых переносится вертикально¹⁰ [11], ноги на основе специальных механизмов, реализующих шаговой цикл при вращательном движении тягового привода¹¹ [12, 13]. Кинематическая схема ноги с использованием пантографного механизма приведена на фиг. 2, б.

При использовании ног, кинематическая схема которых похожа на кинематику ног млекопитающих («лошадиные» ноги) или насекомых (фиг. 2, в, 2, г), для поддержания веса аппарата необходимо совершать работу.

Для оценки энергозатрат на поддержание веса шагающего аппарата рассмотрим плоское движение шагающего аппарата с телескопическими ногами (фиг. 2, д). Механическая мощность в шарнире поворота i -й ноги равна $W_{ai} = N_i V \sin \alpha_i \cos \alpha_i$, а в телескопическом звене ноги механическая мощность равна $W_{ii} = -N_i V \sin \alpha_i \cos \alpha_i$. В силу того что вертикальная реакция в точке опоры i -й ноги, связанная с поддержанием веса аппарата, $N_i \geq 0$ положительная, работа, совершаемая приводами в шарнирах i -й ноги в опорной фазе, равна

$$E_{mi} = V \int_{t_0}^{t_0 + \tau_0} N_i |\sin \alpha_i| \cos \alpha_i dt$$

где t_0 момент начала фазы опоры на i -ю ногу. В процессе движения аппарата реакции в точках опоры ног изменяются, при этом имеется неоднозначность распределения усилий между опорными ногами [8].

Здесь при модельной оценке энергозатрат положим, что реакции в точках опоры всех ног равны между собой и походка такова, что в опоре в каждый момент времени находится одинаковое число ног $n_0 < n$. Пусть также движение ноги в опорной фазе симметрично относительно вертикальной линии, проходящей через точку подвеса ноги к корпусу. Тогда

$$\sin \alpha_i = \frac{S/2 - V(t - t_0)}{[H^2 + [S/2 - V(t - t_0)]^2]^{1/2}}$$

$$\cos \alpha_i = \frac{H}{[H^2 + [S/2 - V(t - t_0)]^2]^{1/2}}$$

$$N_i = Mg/n_0, \quad E_{mi} = MgH \ln(1 + S^2/(4H^2))/n_0$$

Суммарные энергозатраты на поддержание веса во всех ногах аппарата равны

$E_m = \sum E_{mi} = nE_{mi}$ ($i = \overline{1, n}$). Учитывая, что $n_0/n = \beta$, получаем, что удельные энергозатраты на поддержание веса аппарата

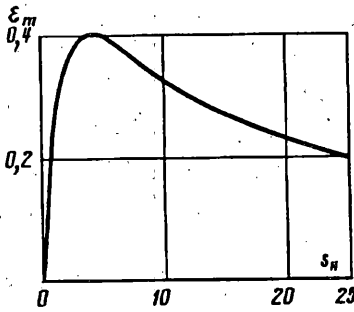
$$\epsilon_m = h \ln(1 + s^2/(4h^2))/s \quad (5)$$

ϵ_m является функцией одного безразмерного параметра $S_H = s/h = S/H$:

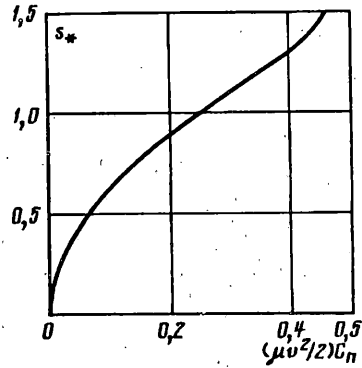
$$\epsilon_m = \ln(1 + S_H^2/4)/S_H$$

¹⁰ Умноз Н. В. Особенности применения механизмов в движителях шагающих машин // Всесоюз. конф. по теории и расчету мобильных машин и двигателей внутреннего сгорания. Тбилиси: Ин-т механики машин АН ГССР, 1985. С. 14.

¹¹ Замятин А. И., Черкасов В. В. Шагающий механизм в виде эллиптического прямилла в прямолинейном движении // 1-я Всесоюз. конф. по механике и управлению движением шагающих машин. Волгоград, 1988. С. 21—22.



Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 3 приведен график зависимости ϵ_m от S_H . При $S_H \rightarrow 0$ энергозатраты $\epsilon_m \rightarrow 0$. С точки зрения минимизации удельных энергозатрат, связанных с поддержанием веса аппарата, выгодно использовать минимально возможную длину шага и максимальный клиренс (семенящая походка $S \rightarrow 0, H \rightarrow L$).

Интересным является факт наличия максимума функции $\epsilon_m(S_H)$ и асимптотическое стремление $\epsilon_m \rightarrow 0$ при $S_H \rightarrow \infty$. Объясняется это тем, что при $S_H = \infty$ или $H = 0, S \neq 0$ телескопическая нога работает как нога с ортогональной кинематической схемой. Сила реакции в точке опоры ноги, связанная с поддержанием веса аппарата, перпендикулярна перемещению телескопического привода, а привод поворота ноги не перемещается. Значение S_H , при котором достигается максимум ϵ_m , обозначим $S_H^* \approx 3,96$. При фиксированной безразмерной длине шага s существует два энергетически оптимальных значения безразмерного клиренса h , соответствующие движению с высокоподнятым корпусом ($S_H \leq S_H^*$) и с малым клиренсом ($S_H \geq S_H^*$). Значения $S_H \geq S_H^*$ соответствуют движению с максимальным углом отклонения ноги от вертикали $\alpha^* \geq \arctg S_H^* \approx 63,2^\circ$. При движении млекопитающих [1] и существующих шагающих аппаратов с телескопическими и лошадиными ногами углы отклонения ног от вертикали α существенно меньше α^* . Поэтому будем исследовать энергозатраты шагающего аппарата с телескопическими ногами в области $S_H \leq S_H^*$. Тогда при фиксированной безразмерной длине шага s энергетически наиболее выгодно использовать конструктивно максимально возможный клиренс, величина которого в силу ограниченности длины ноги и введенных обозначений равна $h^* = 1 - S^2/4$. Тогда минимальное значение удельных энергозатрат, связанных с поддержанием веса шагающего аппарата с телескопическими ногами, равно $\epsilon_m^* = -S^{-1}(1 - S^2/4)^{1/2} \ln(1 - S^2/4)$.

Энергозатраты, связанные с поддержанием веса аппарата с лошадиными ногами, рассмотрены в [2]. Они имеют существенно более сложную зависимость от S и h . Хотя их численные значения при оптимальных значениях S и h мало отличаются от энергозатрат аппарата с телескопическими ногами.

5. Энергозатраты на создание силы тяги. Пусть F_i — горизонтальная реакция в точке опоры i -й ноги. Тогда $\sum F_i = \Phi$ ($i = \overline{1, n}$), а энергозатраты на создание силы тяги

$$E_\varphi = \int_0^T \sum_y W_y^+ dt$$

¹²Лапшин В. В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата. М., 1990. 30 с. (Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР, № 27).

где W_j^+ — положительная мощность в j -м шарнире i -й ноги, связанная с созданием тяги. Предположим, что горизонтальные реакции в точках опоры всех ног всегда направлены в одну сторону. Тогда, как для ортогональной кинематической схемы ног, так и для телескопических ног $\sum W_j^+ = \sum W_j^+ = F_i V \geq 0$, а $E_\varphi = \Phi VT = \Phi S_\lambda$. Удельные энергозатраты на создание силы тяги ϵ_φ равны коэффициенту тяги φ :

$$\epsilon_\varphi = \varphi \quad (6)$$

б. Суммарные энергозатраты на передвижение аппарата. В силу (1)–(6) суммарные удельные энергозатраты ϵ равны:

а) для аппарата с ортогональной кинематической схемой ног

$$\epsilon_o = \varphi + \mu v^2 \beta [1 + (k_v / (1 - \beta) - 1)^2] / (2S) \quad (7)$$

б) для аппарата с телескопическими ногами

$$\epsilon_T = \epsilon_o + h \ln(1 + S^2 / (4h^2)) / S \quad (8)$$

Значения ϵ_o, ϵ_T при оптимальных значениях $k_v = 1, \beta = 3/n$, полученных в п. 3, и оптимальном значении h для аппарата с телескопическими ногами, полученном в п. 4, обозначим через $\epsilon_o^\wedge, \epsilon_T^\wedge$

$$\epsilon_o^\wedge = \varphi + \mu v^2 C_n / (2S) \quad (9)$$

$$\epsilon_T^\wedge = \varphi + \mu v^2 C_n / (2S) - S^{-1} (1 - S^2/4)^{1/2} \ln(1 - S^2/4) \quad (10)$$

где $C_n = 3[1 + 9/(n - 3)^2] / n$, n — число ног аппарата. Для четырехногого аппарата $C_4 = 7,5$, для шестиногого — $C_6 = 1$.

Исследуем зависимость $\epsilon_o^\wedge, \epsilon_T^\wedge$ от безразмерной длины шага S в области $S \leq S_{\max}$, где $S_{\max} \leq 2$, в силу того, что половина длины шага не превышает максимальной длины ноги. Для существующих шагающих аппаратов и животных обычно $S_{\max} \leq 1,5$, что соответствует максимальному отклонению телескопической ноги от вертикали немногим более 45° . Поэтому при проведении численных оценок коэффициента сопротивления движению ϵ положим $S_{\max} \leq 1,5$.

Для аппарата с ортогональной кинематической схемой ног энергетически оптимально всегда использовать конструктивно максимально возможную длину шага $S_o^* = S_{\max}$, а оптимальное значение ϵ_o^* равно $\epsilon_o^* = \epsilon_o^\wedge |_{S=S_{\max}}$.

Для аппарата с телескопическими ногами существует энергетически оптимальное значение безразмерной длины шага, которое определяется из уравнения

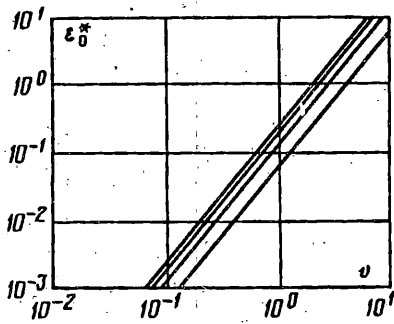
$$\frac{\partial \epsilon_T^\wedge}{\partial S} = -(1 - S^2/4)^{-1/2} [S^{-2} \ln(1 - S^2/4) + 1] - \mu v^2 C_n / (2S^2) = 0$$

Решение этого уравнения S^* зависит от значения $\mu v^2 C_n / 2$. График этой зависимости, полученный в результате численного решения на ЭВМ, приведен на фиг. 4.

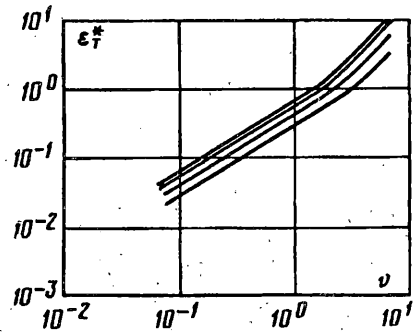
В силу ограничения $S \leq S_{\max}$ положим, что оптимальное значение длины шага равно $S^* = \min(S_{\max}, S_*)$. Оптимальное значение удельных энергозатрат ϵ_m^* равно

$$\epsilon_T^* = \epsilon_T^\wedge |_{S=S^*}.$$

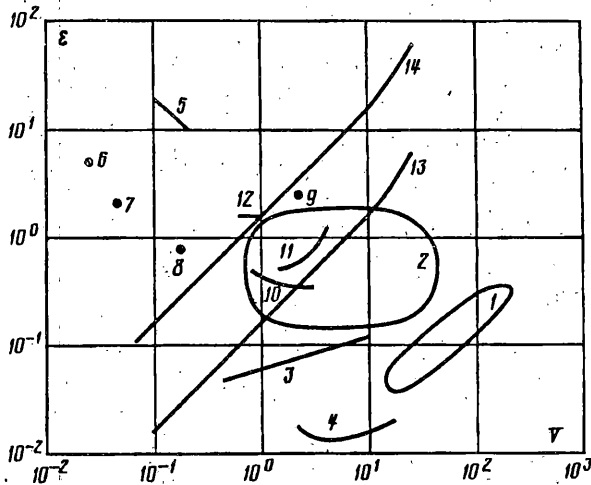
Графики зависимости $\epsilon_o^*, \epsilon_T^*$ от безразмерной скорости движения v для шестиногого аппарата с ортогональными и телескопическими ногами при удельной тяге $\varphi = 0$ и различных значениях удельной массы ног μ ($\mu = 0,2; \mu = 0,4; \mu = 0,6; \mu = 0,8$) приведены соответственно на фиг. 5 и 6. Графики построены в логарифмическом масштабе. Если удельная тяга $\varphi > 0$, то удельные энергозатраты увеличиваются на величину φ .



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

Пусть КПД системы приводов аппарата равен η , тогда энергозатраты на передвижение аппарата с учетом потерь энергии в приводах будут равны ϵ^*/η .

На фиг. 7 приведена зависимость удельных энергозатрат ϵ от скорости движения V в км/ч (отметим, что здесь уже размерная скорость) для различных транспортных средств и животных: 1 — автомобили, 2 — гусеничные машины, 3 — человек, 4 — лошадь, 5 — лабораторный макет электромеханического шагающего аппарата Университета штата Огайо (США), 6 — лабораторный макет электромеханического шагающего аппарата Института механики МГУ — Института проблем передачи информации АН СССР, 7 — натуральный макет электромеханического шагающего аппарата НМША без изменения передаточных отношений редукторов в шарнирах ног, 8 — НМША с двухскоростными коробками передач в шарнирах ног, 9 — натурная гидравлическая шагающая машина компании «Дженерал электрик» (США), 10 — натурная гидравлическая шагающая машина ASV Университета штата Огайо (США), 11 — натурная гидравлическая шагающая машина ШМ75, 12 — натурная гидравлическая шагающая машина Института механики МГУ, 13 — модельные оценки энергозатрат аппарата ШМТЭ при $\eta = 0,5$, 14 — модельные оценки энергозатрат аппарата ШМТЭ при $\eta = 0,05$. Часть этих данных взята из [6, 7], а часть по результатам вычислительных экспериментов по исследованию энергетики движения тяжелых шагающих аппаратов¹³. Для сравнения на фигуре приведены модельные оценки энергозатрат гипотетического шестиногого шагающего аппарата ШМТЭ с телескопическими ногами и $L = 2$ м,

¹³ Лапишин В. В. См. указ. публ., с. 73.

$S_{\max} = 3$ м, $g = 9,8$ м/с² (что примерно соответствует аппаратам ASV и ШМ75) и $\mu = 0,25$ при значениях КПД системы приводов аппарата $\eta = 0,05$ и $\eta = 0,5$.

Модельные оценки достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными и показывают, что можно ожидать создания шагающих машин с удельными энергозатратами (коэффициентом сопротивления движению) как у гусеничных машин, но с меньшими чем у гусеничных машин максимальными скоростями передвижения.

7. О рекуперации энергии при движении шагающего аппарата. В силу того, что при обеспечении колебательного движения ног и при поддержании веса аппарата приводы в шарнирах ног совершают как положительную работу (выделяя энергию), так и отрицательную работу (поглощая энергию), возможна рекуперация энергии за счет накопления ее в некоторых аккумуляторах энергии [2, 4]. В [14] был рассмотрен способ рекуперации энергии колебательного движения ног за счет использования пружин. В аппарате ASV предполагается использовать для этого естественное колебательное движение ног, как гравитационного маятника [7]. Использование рекуперации энергии может существенно уменьшить требуемую мощность энергоустановки шагающего аппарата.

Возможность рекуперации энергии легко учесть в полученных модельных оценках энергозатрат. Пусть КПД рекуперации энергии равен κ (где $0 < \kappa < 1$), тогда $\epsilon = \epsilon_{\varphi} + (1 - \kappa)(\epsilon_m + \epsilon_L)$ и, соответственно, коэффициент $1 - \kappa$ войдет в формулы (7)–(10).

8. Сравнение с энергозатратами на передвижение животных. При значительных скоростях энергозатраты животных существенно меньше полученных модельных оценок энергозатрат на передвижение статически устойчивых шагающих аппаратов (фиг. 7). Объясняется это, по-видимому, следующим. Основной объем энергозатрат при больших скоростях связан с обеспечением колебательного движения ног. Животные уменьшают эти энергозатраты, во-первых, за счет перехода сначала к динамическим режимам шагания, а за тем к бегу, что позволяет увеличить относительную продолжительность фазы переноса ноги (уменьшить характеристику режима работы ноги β). Правда, при беге появляются дополнительные энергозатраты на разгон и торможение центра масс аппарата, связанные с обеспечением баллистической фазы полета. Модельные оценки энергозатрат ходьбы и бега двуногих устройств даны в [3]. Во-вторых, животные используют упругие свойства сухожилий, мышц и костей для рекуперации энергии [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexander R. McN. Mechanics and scaling of terrestrial locomotion.//Scale effects in animal locomotion. London; New York; SanFrancisco: Acad. press, 1977. P. 93—110.
2. Taylor C. R. The energetics of terrestrial locomotion and body size in vertebrates.//Scale effects in animal locomotion. London; New York; SanFrancisco: Acad. press, 1977. P. 127—141.
3. Белецкий В. В. Двуногая ходьба — модельные задачи динамики и управления. М.: Наука, 1984. 286 с.
4. Ларин В. Б. Управление шагающими аппаратами. Киев: Наук. думка, 1980. 168 с.
5. Кемурджиан А. Л., Громов В. В., Кажукало И. Ф. и др. Планетоходы. М.: Машиностроение, 1982. 319 с.
6. Bekker M. G. Introduction to terrain-vehicle systems. Ann Arbor; Michigan: University of Michigan press, 1969. 846 p.
7. Waldron K. J., Vohnout V. J., Pery A., McGhee R. B. Configuration design of the adaptive suspension vehicle.//Intern. J. Robotics Research. 1984. V. 3. N 2. P. 37—48.
8. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 310 с.
9. Петриашвили Б. Д., Маргелашвили В. О., Билашвили М. А. Вопросы конструирования многоногих шагающих машин.//Механика мобильных машин. Тбилиси: Мецниереба, 1986. С. 21—29.

10. *Hirose S.* A study of design and control of a quadruped walking vehicle.//Intern. J. Robotics Research. 1984. V. 3. N 2. P. 113—133.
11. *Kaneko M., Abe M., Tanie K.* A hexapod walking machine with decoupled freedoms.//IEEE J. Robotics and Automation. 1985. N 4. P. 183—190.
12. Научное наследие П. Л. Чебышева. Т. 2. Теория механизмов. М.; Л: Изв-во АН СССР, 1945. 192 с.
13. *Song S. M., Vohnout V. J., Waldron K. J., Kinzel G. L.* Computeraided design of a leg for an energy efficient walking machine.//Mechanism and Machine Theory. 1984. V. 19. N 1. P. 17—24.
14. *Лапшин В. В., Охоцимский Д. Е., Платонов А. К.* Об одном способе рекуперации энергии при движении шагающего аппарата.//Изв. АН СССР. МТТ. 1986. N 5. С. 67—71.

Москва

Поступила в редакцию
29.X.1990