

УДК 621.446

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ШЕСТИНОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА

**Иванова О.Ю., студентка; Рафиков Г.Ш., доцент, к.т.н.**

*(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)*

**Постановка проблемы и ее актуальность.** В настоящее время возникает острая необходимость в оптимизации энергетики движения аппарата. Требуется уменьшить суммарную мощность, потребляемую двигателями для упрощения реализации питания шестиногого шагающего аппарата. С этой целью решена задача расчета энергетических характеристик движения аппарата с точки зрения минимизации средней суммарной мощности, потребляемой двигателями в шарнирах ног шестиногого шагающего аппарата.

**Анализ известных решений.** Данную проблему решали для каждого конкретного случая, общая методика решения этой задачи отсутствовала. В большинстве случаев занимались специальным подбором двигателей, редукторов и т.д. с целью минимизации средней суммарной мощности [1].

**Постановка задачи исследования.** Для решения существующей проблемы необходимо получить математическую модель энергетических характеристик движения и двигателей в шарнирах ног шестиногого шагающего аппарата.

**Цель исследований.** Учет и исследование энергетических характеристик движения аппарата и двигателей в шарнирах ног шестиногого шагающего аппарата. Получение характеристик оптимальных режимов движения при различных видах поверхности.

### **Основной материал исследований.**

Разработка внедорожного транспортного средства, обладающего более высокой грунтовой проходимостью, определяется необходимостью перемещения объектов большого веса и габаритов по грунтам с низкой несущей способностью. Использование традиционных транспортных машин для размещения на них объектов весом во много десятков или сотен тонн в таких условиях крайне затруднено, так как на мягком грунте колесо, погружаясь в почву, оставляет глубокую колею, что в сочетании со значительной работой по деформации грунта приводит к резкому увеличению сопротивления движению. Шагающий аппарат, проваливаясь в грунт, не ухудшает своих тяговых характеристик, и не оставляет сплошной колеи, что важно как для выполнения транспортной функции, так и для защиты окружающей среды, ее почвенного покрова.

Шагающая машина должна использовать заложенные в принципе шагания возможности развязки движения корпуса машины от дороги. За счет изменения движения стоп относительно корпуса шагающая машина может обеспечить комфортабельное (равномерное и прямолинейное) движение корпуса машины при перемещении по поверхности с неровностями,

достигающими величины дорожного просвета машины. Необходимость изменения траектории движения стопы относительно корпуса возникает и при движении по слабым грунтам для компенсации деформации грунта, величина которой различна для разных ног. Для обеспечения высокой проходимости шагающей машины при преодолении крупных препятствий необходимо использовать возможности изменения дорожного просвета, бокового выноса ног, длины шага, наклона корпуса машины относительно опорной поверхности. Маневренность связана с заложенными в шагающий аппарат возможностями движения вперед, назад, вбок и вообще с произвольным углом между направлением движения и продольной осью машины. Шагающая машина может совершать повороты и развороты на месте. Работа ног при повороте принципиально не отличается от работы ног при движении по прямой.

Работа шагающего аппарата требует больших энергетических затрат, так как на каждом суставе находится по исполнительному механизму, которые в целом обеспечивают передвижение аппарата.

При составлении математической модели необходимо учитывать, что потребляемая двигателем в  $j$ -ом шарнире  $i$ -ой ноги электрическая мощность  $W_{ji}$  равна

$$W_{ji} = U_{ji} I_{ji},$$

$$W_{ji} = \frac{R_{ji}}{(c_{ji}^m)^2} \mu_{ji}^2 + \frac{c_{ji}^e}{c_{ji}^m} \mu_{ji} \dot{\alpha}_{ji},$$

где  $U_{ji}, I_{ji}, R_{ji}$  - напряжение, ток, сопротивление якоря двигателя,  $c_{ji}^e$ ,  $c_{ji}^m$  - электрическая и магнитная постоянные электродвигателя,  $\mu_{ji}$  - электромагнитный момент двигателя,  $\dot{\alpha}_{ji}$  - производная угла поворота якоря двигателя в  $j$ -ом шарнире  $i$ -ой ноги.

В режиме торможения  $W_{ji} = U_{ji} I_{ji} < 0$  электродвигатель постоянного тока работает как генератор электроэнергии. Выделяемая при этом электроэнергия может быть использована для подзарядки аккумулятора и в последующем использоваться для обеспечения движения аппарата.

Пусть КПД аккумулятора равен  $\eta_a$ , тогда средняя суммарная электрическая мощность, потребляемая двигателями аппарата в течение интервала времени  $T$  равна

$$W_{cp} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T \sum_{ji} W_{ji}^+ dt + \eta_a \int_0^T \sum_{ji} W_{ji}^- dt \right\},$$

где

$$W_{ji}^+ = \begin{cases} W_{ji}, & \text{если } W_{ji} > 0 \\ 0, & \text{если } W_{ji} \leq 0 \end{cases},$$

$$W_{ji}^- = W_{ji} + W_{ji}^+.$$

При подключении двигателей в шарнирах ног в режиме динамического торможения при  $W_{ji} < 0$  якорь двигателя отключается от цепи питания и замыкается на нагрузочное сопротивление. Выделяемая при торможении двигателя энергия рассеивается в виде тепла на этом сопротивлении. В этом случае средняя суммарная мощность, потребляемая двигателями аппарата, равна

$$W^D_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{ji} W^+_{ji} dt ,$$

что равносильно  $\eta_a = 0$ .

Режим динамического торможения в данной работе рассматривается, как основной режим подключения двигателей в шарнирах ног. Для исследования целесообразности рекуперации энергии при генераторном режиме торможения двигателей вычисляется средняя суммарная мощность двигателей аппарата при КПД аккумулятора  $\eta_a = 1$

$$W^G_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{ji} W_{ji} dt .$$

Платой за возможность рекуперации энергии является необходимость иметь на борту аппарата аккумуляторную батарею.

В работе рассматривалось движение аппарата по горизонтальной поверхности и вверх по склонам с углом наклона к горизонту  $15^\circ$  и  $30^\circ$  походкой «трешки» с коэффициентом перекрытия  $k = 0$ . Корпус аппарата движется параллельно опорной поверхности. Результаты расчетов показали, что энергетически оптимальное значение максимальной высоты подъема ног при переносе  $h = 0$ , где  $h$  - высота подъема ног при переносе [2, 3]. Значение  $h$  было положено равным фиксированной величине  $h = 0.05$  м.

Для определения энергетически оптимальных значений остальных кинематических параметров движения аппарата: клиренса  $H$ , ширины колеи  $B$ , длины шага  $S$ , асимметрии шага  $\Delta$  использовался численный метод минимизации функционала по максимальному правдоподобному направлению, не требующий вычисления производной.

В табл. 1 приведены характеристики энергетически оптимальных режимов движения по горизонтальной плоскости со скоростью 0,7 км/ч и 0,3 км/ч, вверх по склону с углом наклона к горизонту  $15^\circ$  со скоростью 0,5 км/ч и вверх по склону с углом наклона к горизонту  $30^\circ$  со скоростью 0,07 км/ч. Приведены также характеристики движения аппарата вниз.

Средняя электрическая мощность, потребляемая двигателями аппарата при подключении их в режиме динамического торможения,  $W^d_{cp}$  при движении по горизонтальной поверхности равна 91,2 Вт при  $V = 0.7$  км/ч и  $W^d_{cp} = 47.0$  Вт при  $V = 0.3$  км/ч, при движении вверх по склону  $15^\circ$   $W^d_{cp} = 350.8$  Вт при

$V = 0.5$  км/ч, а при движении вверх по склону  $30^\circ$   $W_{cp}^d = 126.1$  Вт при  $V = 0.07$  км/ч.

Таблица 1 – Характеристики энергетически оптимальных режимов движения аппарата по горизонтальной поверхности и по склонам при высоте подъема ног 0,05 м и коэффициентах редукции в шарнирах платформ  $K1 = 500$ , в шарнирах бедер  $K2 = 3500$ , в шарнирах колен  $K3 = 900$

№	$\alpha_0$	$V$	$S$	$H$	$B$	$\Delta$	$\dot{\alpha}_1^{\max}$	$\dot{\alpha}_2^{\max}$	$\dot{\alpha}_3^{\max}$	$M_1^{\max}$	$M_2^{\max}$	$M_3^{\max}$
	град	км/ч	м				рад/с			Нм		
	0	0,7	1,10	0,48	1,88	0	463	498	256	0,09	0,35	0,04
	0	0,3	1,03	0,34	1,82	0	214	256	303	0,07	0,32	0,03
	15	0,5	1,42	0,26	1,72	-0,123	395	627	336	0,49	0,32	0,23
	30	0,07	0,36	0,05	1,39	-0,338	26	404	32	0,25	0,23	0,20
	-15	0,5	1,42	0,26	1,72	0,123	395	627	336	0,28	0,3	0,12
	-30	0,07	0,36	0,05	1,39	0,338	26	404	32	0,13	0,11	0,10

№	$W_1^{\max}$	$W_2^{\max}$	$W_3^{\max}$	$W_{cp}^d$	$W_{cp}^{1d}$	$W_{cp}^{2d}$	$W_{cp}^{3d}$	$W_{cp}^G$	$W_{\max}^d$	$W_{\max}^G$
	Вт									
1	15,9	36,2	6,6	91,2	31,6	44,3	15,2	87,0	161,6	158,9
2	6,5	23,1	2,6	47,0	14,2	26,4	6,3	46,7	74,8	74,2
3	129,8	115,3	53,3	350,8	212,9	74,1	63,8	349,8	396,5	369,2
4	14,5	31,5	19,8	126,1	16,8	66,4	42,9	126,1	154,1	154,1
5	9,8	23,6	11,2	43,0	3,4	28,1	11,3	-49,0	101,5	11,4
6	1,1	6,5	2,0	15,6	1,2	11,0	3,3	-0,5	26,4	10,5

Среднее значение суммарной мощности двигателей в  $j$ -ых шарнирах ног при подключении двигателей в режиме динамического торможения обозначим

$$W_{cp}^{jd} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^6 W_{ji}^+ dt,$$

где  $T$  - период движения аппарата.

При движении по горизонтальной поверхности со скоростью  $V = 0.7$  км/ч  $W_{cp}^{1d} = 31.6$  Вт,  $W_{cp}^{2d} = 44.3$  Вт,  $W_{cp}^{3d} = 15.2$  Вт.

На двигатели во вторых шарнирах приходится 48,6% энергозатрат аппарата. Это вызвано тем, что в основном за счет этих двигателей поддерживается вес аппарата. В шарнирах бедер требуются большие значения коэффициентов редукции, которые энергетически не выгодны для обеспечения движения переноса ног. Поэтому переход к другой кинематике ног, не требующей энергозатрат на поддержание веса аппарата, позволит заметно сократить энергозатраты аппарата.

Возможность рекуперации энергии при подключении двигателей в генераторном режиме торможения при энергетически оптимальном режиме движения по горизонтальной поверхности и вверх по склонам позволяет уменьшить среднюю мощность, потребляемую двигателями аппарата на несколько ватт. Это вызвано тем, что мала скорость движения аппарата и

велико трение в шарнирах ног. При движении же вниз по склону  $15^\circ$  в режиме генераторного торможения двигателя вырабатывают больше энергии, чем потребляют.

Для движения аппарата по горизонтальной поверхности со скоростью  $0,7$  км/ч построены зависимости энергозатрат аппарата от каждого из параметров  $S, H, B, \Delta, k, h, k_1, k_2, k_3$  при фиксированных значениях остальных параметров, соответствующих энергетически оптимальному режиму движения  $h = 0.05$  м,  $k_1 = 500$ ,  $k_2 = 3500$ ,  $k_3 = 900$ . Графики представлены на рис. 1,2.

Для каждого из параметров  $S, H$  существует довольно значительный диапазон, в котором значение средней мощности  $W_{cp}^d$  мало отличается от оптимального. При  $S \in [0.8\text{ м}, 1.4\text{ м}]$ ,  $H \in [0.35\text{ м}, 0.6\text{ м}]$   $W_{cp}^d$  не превышает  $100$  Вт (при оптимальных значениях этих параметров  $W_{cp}^d = 91.2$  Вт).

Энергетика движения аппарата существенно зависит от высоты подъема ног  $h$ . При энергетически наиболее выгодном значении  $h = 0$   $W_{cp}^d$  на  $30\%$  меньше, чем при основном расчетном значении  $h = 0.05$  м. Это объясняется тем, что на шарнир бедра приходится основная величина усилий по поддержанию веса аппарата, что приводит к большему значению коэффициента редукции в этом шарнире. Увеличение высоты подъема ног приводит к увеличению диапазона изменения скоростей и ускорений углов в шарнирах платформ.

Оптимальное значение асимметрии шага примерно равно нулю.

Энергетически выгодно использовать движение с коэффициентом перекрытия  $k = 0$ . Однако при  $0 < k < 0.15$   $W_{cp}^d < 100$  Вт (при  $k = 0$   $W_{cp}^d = 91.2$  Вт).

При подключении двигателей в генераторном режиме торможения значение средней мощности аппарата  $W_{cp}^d$  меньше отличается от оптимального при изменении каждого из параметров  $S, H, B, \Delta, k, h, k_1, k_2, k_3$ , чем при подключении двигателей в режиме динамического торможения.

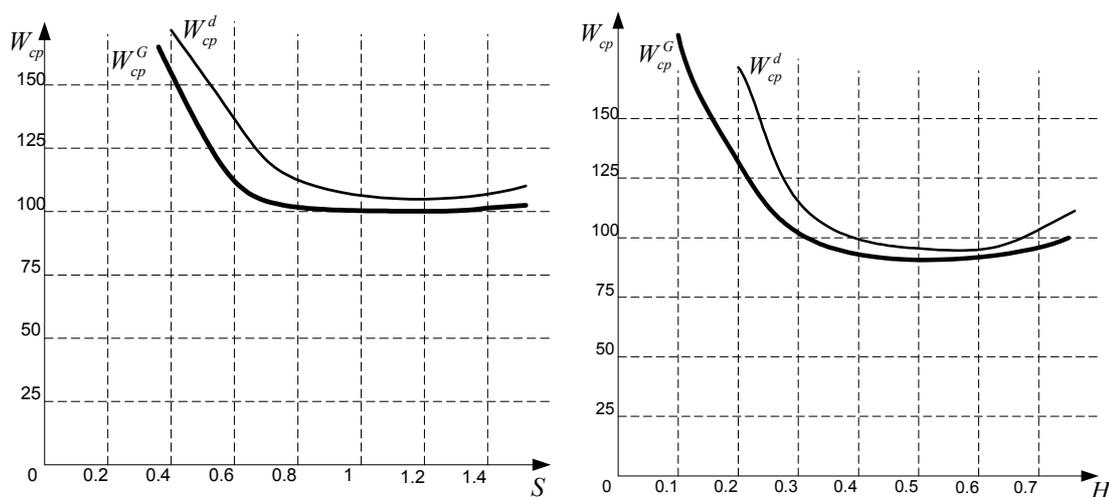


Рисунок 1 – Движение по горизонтальной поверхности со скоростью  $0,7$  км/ч. Зависимость средней мощности аппарата от длины шага  $S$  и клиренса  $H$ .

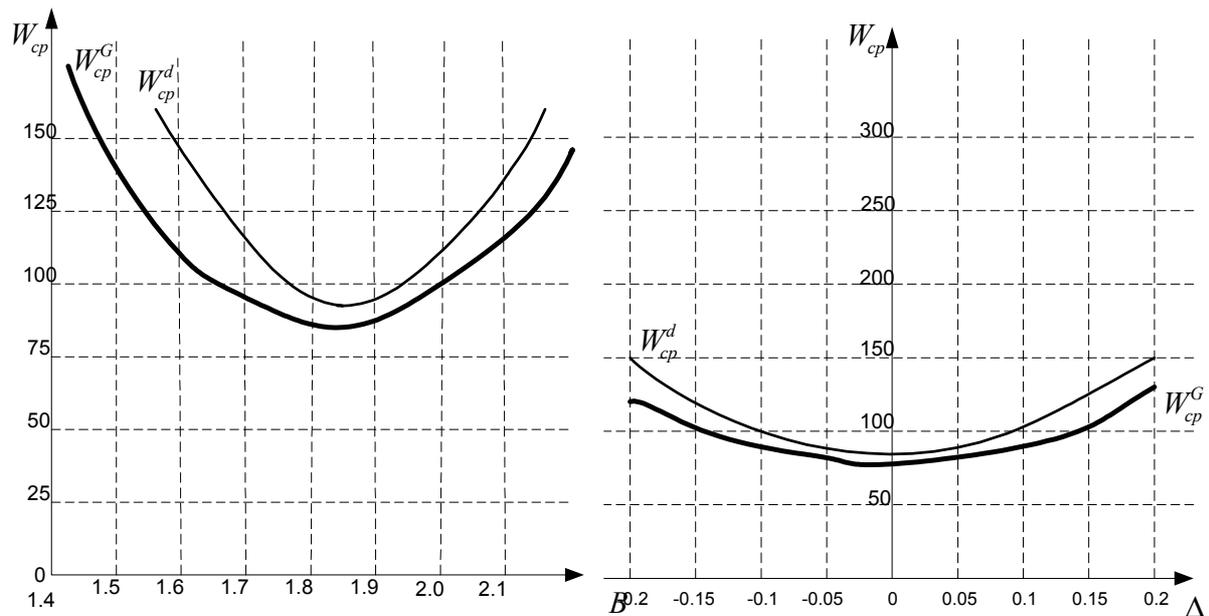


Рисунок 2 – Движение по горизонтальной поверхности со скоростью 0,7 км/ч. Зависимость средней мощности аппарата от ширины колеи  $B$  и асимметрии шага  $\Delta$ .

**Выводы.** Таким образом в работе: 1. Получена математическая модель энергетики движения, исследована зависимость энергозатрат аппарата от кинематических параметров движения. 2. Решена задача параметрической оптимизации кинематики движения аппарата с точки зрения минимизации средней мощности, потребляемой двигателями в шарнирах ног, для движения по горизонтальной поверхности и вверх по склонам с углом наклона к горизонту  $15^\circ$  и  $30^\circ$ . 3. Получены зависимости средней мощности аппарата от длины шага  $S$  и клиренса  $H$ , ширины колеи  $B$  и асимметрии шага  $\Delta$ .

### Перечень ссылок

1. Исследование робототехнических систем. Сб. научных статей. Отв. редакторы: И. М. Макаров, Д. Е. Охоцимский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1982. 246с.
2. Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Кугушев Е. И., Ярошевский В. С. Система построения движения шагающего аппарата. Модель ТЗ: Препринт Ин-та прикл. математики АН СССР № 7. М., 1977. 62 с.
3. Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Математическое моделирование динамики движения шагающего аппарата.: Препринт Ин-та прикл. математики АН СССР № 96. М., 1984. 28 с