

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ДВИЖЕНИЯ ШЕСТИНОГОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПО СКЛОНАМ

Рафиков Г.Ш., Иванова О.Ю.

Донецкий национальный технический университет,  
кафедра автоматики и телекоммуникаций

### Abstract

*Raphikov G.S., Ivanova O.Y. Parametric optimization of six-leg walking machine power motion on a horizontal surface and on slopes. Vehicle power inputs' dependence on the values of each of the reduction coefficients for the motion on a horizontal surface is built in the given article. Transition to the power optimum values of the reduction coefficients for motion on a horizontal surface allows to shorten power inputs of the vehicle approximately by 35% for motion on a horizontal surface, but substantially worsens energy of motion of vehicle on the slopes and when overcoming obstacles.*

**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 параметрической оптимизации движения аппарата с точки зрения минимизации средней суммарной мощности, потребляемой двигателями аппарата при подключении их в режиме динамического торможения.

**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 произвести исследование параметрической оптимизации движения аппарата по горизонтальной опорной поверхности и по склонам. Получить характеристики оптимальных режимов движения по указанным видам поверхности.

**Цель исследований.** Найти параметры для энергетически оптимальных режимов движения аппарата при различных видах опорной поверхностей.

**Основной материал исследований.** Рассматривается 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. 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 правдоподобию направлению, не требующий вычисления производной.

В таблице 1 приведены характеристики энергетически оптимальных режимов движения по горизонтальной плоскости со скоростью 0,7 км/час и 0,3 км/час, вверх по

склону с углом наклона к горизонту  $15^\circ$  со скоростью 0,5 км/час и вверх по склону с углом наклона к горизонту  $30^\circ$  со скоростью 0,07 км/час. Приведены также характеристики движения аппарата вниз.

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/час	м				рад/сек			нм		
1	0	0,7	1,10	0,48	1,88	0	463	498	256	0,09	0,35	0,04
2	0	0,3	1,03	0,34	1,82	0	214	256	303	0,07	0,32	0,03
3	15	0,5	1,42	0,26	1,72	-0,123	395	627	336	0,49	0,32	0,23
4	30	0,07	0,36	0,05	1,39	-0,338	26	404	32	0,25	0,23	0,20
5	-15	0,5	1,42	0,26	1,72	0,123	395	627	336	0,28	0,3	0,12
6	-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

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

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 двигатели 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 рисунках 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.

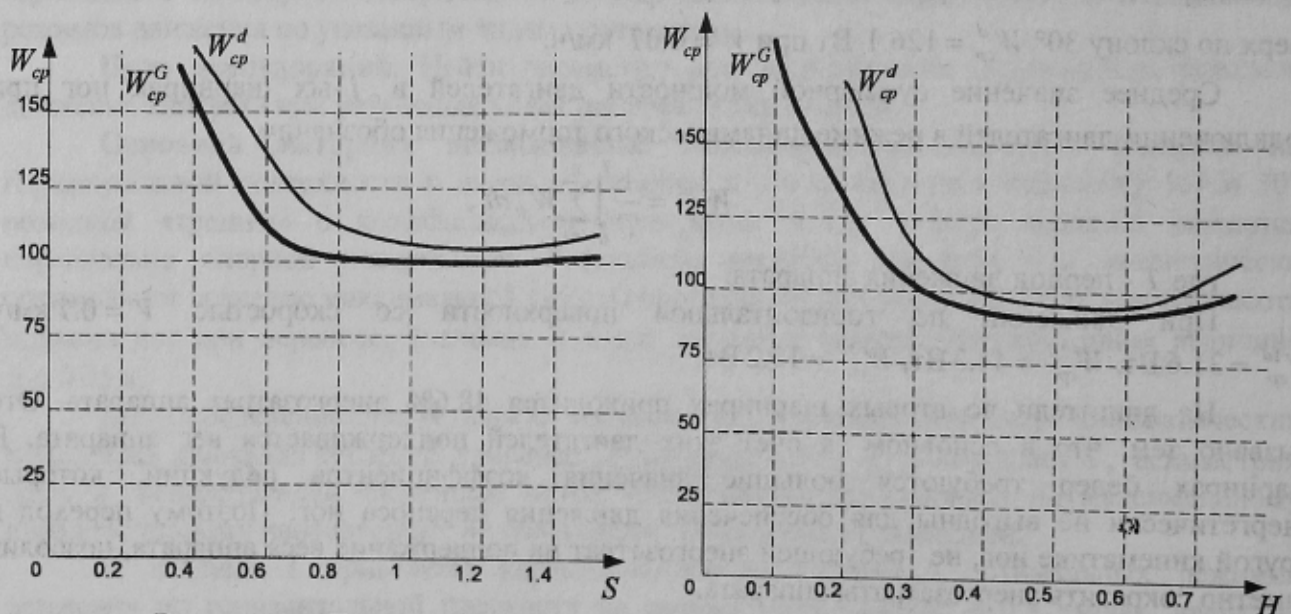


Рисунок 1 – Движение по горизонтальной поверхности со скоростью  $0,7$  км/ч.

Зависимость средней мощности аппарата от длины шага  $S$  и клирса  $H$ .

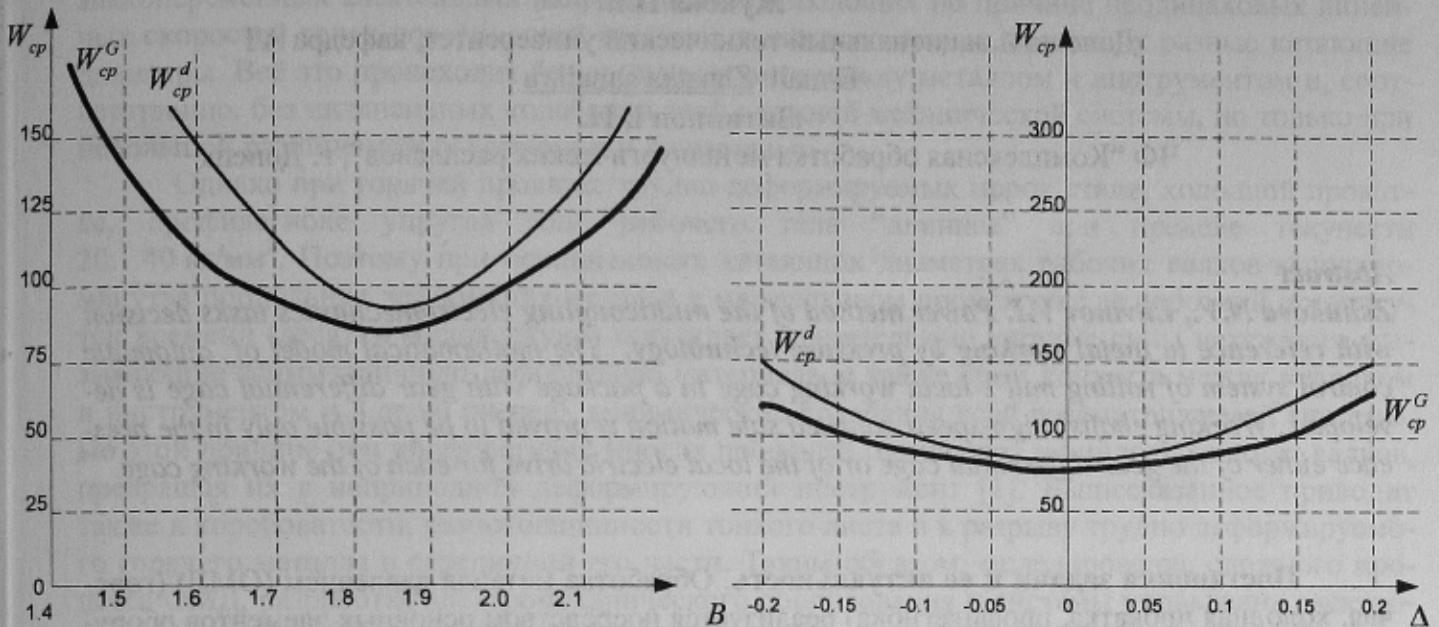


Рисунок 2 – Движение по горизонтальной поверхности со скоростью 0,7 км/ч. Зависимость средней мощности аппарата от ширины колеи  $B$  и асимметрии шага  $\Delta$ .

**Выводы.** В работе исследована зависимость энергозатрат аппарата от кинематических параметров движения. 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  $30^\circ$ . Получены зависимости средней мощности аппарата от длины шага  $S$  и клирса  $H$ , ширины колеи  $B$  и асимметрии шага  $\Delta$ .

**Литература**

1. Исследование робототехнических систем. Сб. научных статей. Отв. редакторы: И. М. Макаров, Д. Е. Охоцимский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1982. 246с.
2. Голубев Ю. Ф. Моделирование динамики движения шагающего аппарата: Препринт Ин-та прикл. математики АН СССР № 96. М., 1979. 27 с.
3. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
4. 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.