

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ КАК СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ

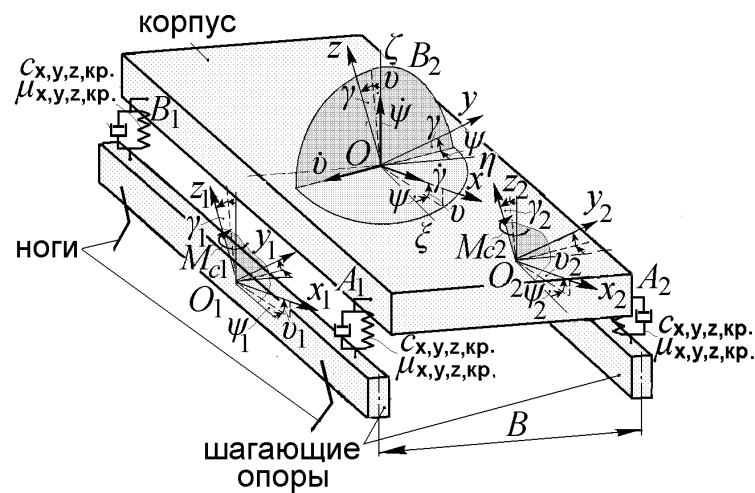
Чернышев В.В. (Волгоград, Россия)

Mobile robot-technical systems with doubled cycle walking mechanisms working in the counter-phase are observed. At low speeds of movement the major volume of energy expenditure in machines here observed is connected with the ascend and descend of the machine body at each cycle (step) of movement. The report discusses possibilities of decreasing such energy expenditures by means of passive support methods.

Использование в мобильных робототехнических системах с шагающими движителями цикловых механизмов шагания, работающих в противофазе, позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости, и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В итоге машина имеет минимальное число управляемых степеней свободы и становится существенно проще и намного дешевле зарубежных аналогов [1, 2]. С другой стороны, движитель рассматриваемого типа, сочетающий простоту конструкции с хорошей траекторией пока не известен. Использование простых и надежных четырехзвенных механизмов шагания, вследствие несовершенства траектории их опорной точки, приводит к вертикальным перемещениям корпуса при каждом цикле (шаге) движения. Анализ показывает, что при невысоких скоростях передвижения основной объем энергозатрат у шагающих машин с цикловыми движителями связан именно с колебаниями корпуса. В работе обсуждается динамическая модель шагающей машины, которая позволяет, помимо динамического анализа статически устойчивых режимов движения, осуществлять выбор связей корпуса и шагающих опор (параметров подвески), обеспечивающих, помимо традиционных для подвески функций, взаимную компенсацию сил инерции частей машины в каждом цикле движения.

Шагающая машина рассматривалась как соединенная упруго-диссипативными связями система тел — корпуса машины и шагающих модулей (шагающих опор) правого и левого борта (рис.1). Корпус считался абсолютно твердым телом. Шагающие опоры, в свою очередь, рассматривались как шарнирно соединенная совокупность абсолютно твердых тел — корпуса (несущей балки) и звеньев шагающих движителей (ног). Движители — на базе плоских циклических механизмов шагания работающих в

противофазе. Для обеспечения статически устойчивой походки движители каждого борта кинематически взаимосвязаны. Силовой привод шагающих опор — побортно независимый. Считалось, что он обладает достаточным запасом мощности для поддержания колебаний и угловая скорость ведущих кривошипов в течение цикла остается неизменной.



Положение системы координат  $Oxyz$ , жестко связанной с корпусом в центре масс, относительно осей  $O\xi\eta\zeta$ , неподвижно ориентированных в пространстве, задавалось с помощью углов рыскания  $\psi$ , тангажа  $\nu$  и крена  $\gamma$ . Направление осей  $Oxyz$  совпадает с главными осями инерции корпуса. Положение систем координат  $O_k x_k y_k z_k$ , жестко связанных с шагающими опорами ( $k=1, 2$ ), относительно осей  $O\xi\eta\zeta$  задавалось с помощью углов  $\psi_k, \nu_k, \gamma_k$  которые образуются аналогично углам  $\psi, \nu, \gamma$ . Корпус соединен с шагающими опорами посредством упруго диссипативных связей. Жесткость связей и коэффициенты вязкого сопротивления раскладывались по осям  $Ox, Oy$  и  $Oz$  на  $c_x, c_y, c_z$  и  $\mu_x, \mu_y, \mu_z$ , соответственно.

Для описания движения шагающей машины использовались уравнения, отнесенные к подвижной системе координат  $Oxyz$ :

$$\begin{aligned}
 m(\dot{v}_x + \omega_y v_z - \omega_z v_y) &= R_x, & J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z &= M_x, \\
 m(\dot{v}_y + \omega_z v_x - \omega_x v_z) &= R_y, & J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z &= M_y, \\
 m(\dot{v}_z + \omega_x v_y - \omega_y v_x) &= R_z, & J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y &= M_z.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $m$  — масса корпуса;  $J_x, J_y, J_z$  — центральные моменты инерции корпуса относительно связанных осей координат  $Oxyz$ ;  $v_x, v_y, v_z$  и  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — проекции векторов  $\vec{v}_O$  и  $\vec{\omega}_O$  на оси  $Oxyz$ ;  $R_x, R_y, R_z$  — силы, действующие на корпус машины по осям

связанной системы координат (силы тяжести, реакции упругих и диссипативных элементов, шарниров в точках крепления подвески);  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  — моменты, действующие на корпус машины.

Система дифференциальных уравнений (1) дополнялась кинематическими уравнениями Эйлера, выражениями для направляющих косинусов и формулами для составляющих скоростей в инерциальной системе координат.

Движение корпуса происходит под действием кинематических возмущений, создаваемых шагающими опорами и передаваемых корпусу через подвеску. Характер кинематических возмущений определяется траекториями опорных точек механизмов шагания в относительном движении и считался заданным. При составлении уравнений движения звеньев механизма шагания их угловые скорости выражались через скорости точек, на которые налагаются внешние связи. Обобщенная модель, состоящая из динамических уравнений для корпуса машины и кинематических уравнений для движения шагающих опор в плоскости шагания, дополнялась уравнениями, характеризующими связи корпуса и шагающих опор, определяемые схемой подвески.

Моделирование пространственных колебаний шагающей машины, как системы твердых тел с упруго диссипативными связями, показало, что методами пассивного подрессоривания, при соответствующем выборе собственных частот подвески, можно снизить в режиме максимального энергопотребления амплитуду мощности расходуемой на передвижения, за счет эффекта взаимной компенсации сил инерции корпуса и шагающих опор, и одновременно уменьшить вертикальные колебания корпуса, обусловленные шагающим способом передвижения. Эффект становится заметным при скорости порядка 5 км/ч и резко возрастает при ее увеличении, так как энергозатраты на вертикальные силы инерции пропорциональны кубу курсовой скорости.

### **Литература**

1. Мобильный робототехнический комплекс на базе многоопорной шагающей машины: динамика движений /Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Тельдеков А.В. //Мехатроника: Механика. Автоматика. Электроника. Информатика. — 2001.—№3.—С.19–27.

2. Брискин Е.С., Чернышев В.В. Экспериментальные исследования динамики многоопорной шагающей машины с движителями лямбдаобразного вида //Изв. вузов. Машиностроение.—1999.—№4.—С.32–37.