

УДК 531.8

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА

ЛАПШИН В. В., ОХОЦИМСКИЙ Д. Е., ПЛАТОНОВ А. К.

Исследование динамики и энергетики движения шестиногих шагающих аппаратов, перемещающихся в рамках статической устойчивости с достаточно большой для шагающих аппаратов скоростью движения (до 10 км/ч), показало необходимость исследования возможности рекуперации энергии при движении шагающих аппаратов [1, 2]. В публикуемой работе рассмотрен один из способов рекуперации энергии колебательного движения ног относительно корпуса шестиногого аппарата за счет использования упругих элементов.

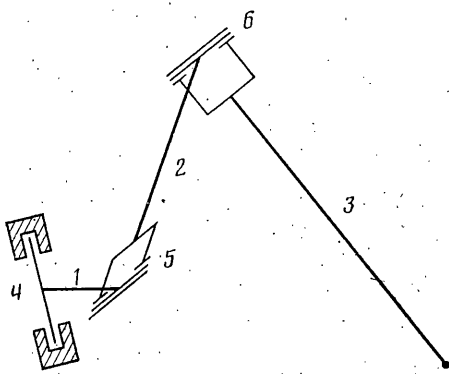
1. Рассмотрим аппарат, состоящий из корпуса и шести одинаковых весомых ног. Система координат $Oxyz$ жестко связана с корпусом аппарата. Аппарат движется осью Oy вперед, ось Oz является конструктивной вертикалью аппарата. Положение аппарата относительно осей абсолютной системы координат $O_1\xi\eta\zeta$ определяется координатами точки O корпуса и углами тангажа, крена и рысканья.

Кинематическая схема ноги приведена на фиг. 1. Нога состоит из платформы 1, бедра 2 и голени 3. Звенья ноги лежат в одной плоскости, называемой плоскостью ноги. Положение ноги относительно корпуса определяется углами: α — угол поворота плоскости ноги вокруг оси 4, параллельной конструктивной вертикали Oz (угол в шарнире платформы); β — угол поворота бедра вокруг горизонтальной оси 5 (угол в шарнире бедра), φ — угол поворота голени вокруг горизонтальной оси 6 (угол в коленном шарнире).

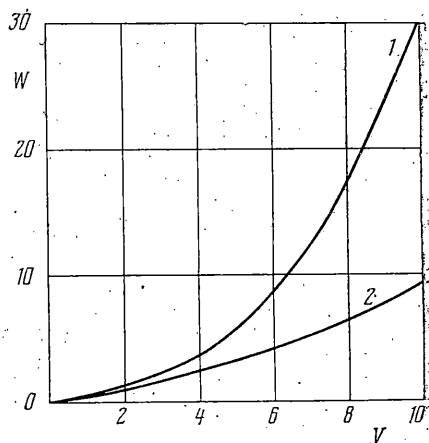
Перспективность использования шагающих машин связана с их более высокой профильной проходимостью по сравнению с традиционными видами транспорта (колесным и гусеничным) [3]. Однако существенным недостатком шагающих машин (как аппарата рассматриваемой кинематической схемы, так и других) является резкое увеличение энергозатрат с ростом скорости движения. Известно [2], что при изменении только скорости V движения шагающего аппарата, перемещающегося в рамках статической устойчивости, средняя выходная мощность его приводов изменяется в соответствии с законом $W=c_1V+c_2V^3$, где c_1, c_2 — постоянные для данного режима движения коэффициенты. Причем первая составная часть средней мощности аппарата W , пропорциональная скорости движения, связана с поддержанием веса аппарата, а вторая, пропорциональная кубу скорости, — с обеспечением колебательного движения ног относительно корпуса [2].

Одним из способов уменьшения энергозатрат шагающего движителя при увеличении скорости является увеличение продолжительности шагового цикла за счет увеличения длины шага и увеличения отношения продолжительности фазы переноса ноги к продолжительности опорной фазы [2].

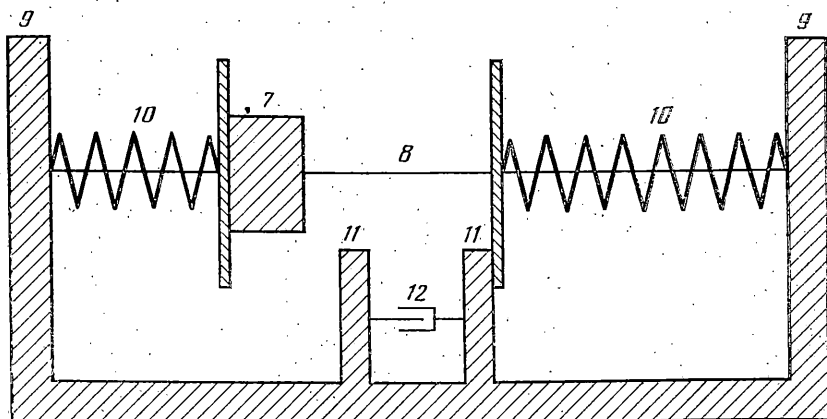
В рамках статической устойчивости для шестиногого аппарата при значительных скоростях движения энергетически наиболее выгодным является движение походкой «трешки» с конструктивно максимально возможной длиной шага. Ноги аппарата разделены на две группы — трешки, каждая из которых состоит из передней и задней ног одной стороны ап-



Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2

парата и средней ноги другой стороны. Ноги, принадлежащие одной трещке, поднимаются и ставятся на опорную поверхность одновременно. Время совместного стояния двух трещек равно нулю. Однако даже при использовании энергетически наиболее выгодного режима движения уже при скоростях 5—10 км/ч основной объем энергозатрат шагающего аппарата, перемещающегося в рамках статической устойчивости, связан с обеспечением колебательного движения ног относительно корпуса (поворот ноги вокруг оси вертикального шарнира платформы является основным транспортным движением ноги относительно корпуса).

2. Рассмотрим возможность рекуперации энергозатрат шагающего движителя за счет рекуперации энергии при разгоне и торможении ног относительно корпуса путем установки в шарнире платформы специального устройства — компенсатора шарнирных моментов, состоящего из двух упругих элементов, создающих компенсирующие моменты разного знака, и устройства, подключающего в зависимости от положения ноги (знака угла в шарнире платформы α) только один упругий элемент, развивающий усилие, стремящееся повернуть ногу в среднее положение $\alpha=0$, т. е. перпендикулярно продольной оси аппарата.

Похожий способ использования упругих элементов для рекуперации энергии и организации циклического движения манипуляционного робота с собственной частотой, определяемой упругими элементами, предложен в [4].

Принципиальная схема такого устройства приведена на фиг. 2, где вместо поворота платформы ноги для простоты изображения рассматривается линейное перемещение тела 7 вдоль оси 8.

Это устройство состоит из корпуса 9, закрепленного на корпусе аппарата, двух одинаковых упругих элементов 10 и упоров 11, ограничивающих область работы каждого из этих упругих элементов. Начальная деформация упругих элементов 10 значительно больше их деформации при движении ноги. Компенсирующий момент M_i^k , создаваемый упругими элементами компенсатора в шарнире платформы i -й ноги, является кусочно-постоянной функцией угла в этом шарнире $M_i^k = -M \sim \text{sign } \alpha_i$.

Покажем, что компенсаторы шарнирных моментов могут в основном обеспечивать движение ног относительно корпуса при движении шестиногого аппарата трешками с кусочно-постоянными значениями ускорений стоп переносимых ног в абсолютной системе координат.

Рассмотрим движение аппарата по горизонтальной плоскости $O_1\xi\eta$. Корпус аппарата движется равномерно и прямолинейно, параллельно опорной поверхности. Направление движения совпадает с осью $O_1\eta$.

Все ноги аппарата одинаковы. Обозначим: m — приведенная к стопе масса ноги, w_i — ускорение стопы переносимой ноги вдоль оси $O_1\eta$, S — длина шага на местности, B — боковой вынос ноги или расстояние от стопы до точки подвеса ноги к корпусу вдоль оси $O_1\eta$ (B одинаково для всех ног и не меняется при движении аппарата), M_i — момент в шарнире платформы i -й ноги, i_1, i_2, i_3 — номера переносимых ног, i_1^0, i_2^0, i_3^0 — номера опорных ног. Предположим, что приведенная к стопе масса ноги постоянна.

Все переносимые и все опорные ноги движутся одинаково, следовательно, $\alpha_{i_1} = \alpha_{i_2} = \alpha_{i_3} = \alpha$, $\alpha_{i_1^0} = \alpha_{i_2^0} = \alpha_{i_3^0} = \alpha_0$, $M_{i_1} = M_{i_2} = M_{i_3} = M$. Ускорения стоп переносимых ног являются кусочно-постоянными функциями α , т. е. $w = -|w| \text{sign } \alpha$; а величина $|w|$ определяется из условия переноса стопы на расстояние S за время переноса ноги $T = 1/2 S/V$ и условий безударности отрыва и постановки ног на опорную поверхность $|w| = 16V^2/S$. Тогда моменты в шарнирах платформ переносимых ног равны $M = mwB = -(16mV^2B/S) \text{sign } \alpha$.

Моменты в шарнирах опорных ног определяются через реакции опорной поверхности. Момент относительно оси шарнира платформы создают только проекции реакции в точке опоры ноги на оси $O_1\xi$ и $O_1\eta$. Сумма реакций в точках опоры ног в проекции на ось $O_1\xi$ равна нулю. Положим, что реакции в проекции на ось $O_1\xi$ равны нулю для каждой из опорных ног. Сумма реакций в точках опоры ног в проекции на ось $O_1\eta$ равна $R_\eta = m_a \dot{w}_a$, где m_a — масса аппарата, w_a — ускорение центра масс аппарата. При движении походкой трешки в рамках сделанных предположений $\dot{w}_a = 3mw/m_a$.

Положим, что реакции в проекции на ось $O_1\eta$ равны для всех трех опорных ног. Тогда моменты в шарнирах платформ опорных ног равны

$$M_{i_1^0} = M_{i_2^0} = M_{i_3^0} = -(16mV^2B/S) \text{sign } \alpha_0$$

В результате для i -й ноги как в опорной фазе движения, так и в фазе переноса имеем

$$M_i = -(16mV^2B/S) \text{sign } \alpha_i$$

Положим, что величина момента, создаваемого компенсатором шарнирных моментов, равна

$$M \sim = 16mV^2B/S \quad (1)$$

Тогда установка компенсаторов в шарнирах платформ ног полностью обеспечивает движение ног относительно корпуса. Работа, совершаемая упругими элементами компенсаторов в течение периода движения аппарата, равна нулю. Энергия, запасенная в компенсаторах, не рассеивается при движении аппарата и энергозатраты в шарнирах платформ равны нулю.

На самом деле в силу непостоянства приведенной к стопе массы ноги (величина m зависит от значений углов в шарнирах ноги) и наличия

трения в шарнирах, а также для обеспечения движения аппарата по неровной поверхности, кроме установки компенсаторов в шарнирах платформ ног необходимо дополнительно подводить энергию от привода.

В силу (1) при изменении скорости движения аппарата V необходимо изменять величину компенсирующего момента M^{\sim} . Введем в конструкцию компенсатора шарнирных моментов привод 12, который может изменять расстояние между упорами 11 (см. фиг. 2). Тогда можно обеспечить эффективную работу компенсатора с неизменным значением величины компенсирующего момента M^{\sim} при различных скоростях движения шагающей машины.

Пусть V_* — максимально допустимая скорость движения аппарата. При скорости движения V меньшей V_* необходимо увеличить расстояние между упорами 11. При этом зависимость компенсирующего момента от угла в шарнире платформы имеет вид $M_i^k = -M_* \sim \text{sign } \alpha_i$ при $|\alpha_i| \geq \alpha_*$, $M_i^k = 0$ при $|\alpha_i| < \alpha_*$; где $M_* \sim = 16mV^2B/S$. Тогда, если $m = \text{const}$, то компенсатор шарнирных моментов обеспечивает перенос стопы на заданное расстояние S в течение фазы переноса и безударность отрыва и постановки ноги на опорную поверхность. Ускорение стопы переносимой ноги в проекции на ось $O_1\eta$ при этом имеет вид $w = w_*$ при $0 \leq t - t_0 \leq T_*$; $w = 0$ при $T_* < t - t_0 < T - T_*$; $w = -w_*$ при $T - T_* \leq t - t_0 \leq T$, где $w_* = 16V_*^2/S$.

Здесь t — текущее время, t_0 — начало фазы переноса ноги, T — время переноса ноги

$$T_* = \frac{1}{2}T(1 - \sqrt{1 - (V/V_*)^2}), \quad \alpha_* = \arctg \frac{1}{4}(S + 4VT_* - 2w_*T_*^2)/B$$

3. В силу непостоянства приведенной к стопе массы ноги и энергозатрат в бедренных и коленных шарнирах ног необходимо дополнительно рассмотреть вопрос об эффективности использования компенсаторов в шарнирах платформ с точки зрения сокращения энергозатрат аппарата.

Проведем это исследование методом математического моделирования, используя построенную ранее систему расчета на ЭВМ кинематических, динамических и энергетических характеристик движения шагающего аппарата [1, 2].

Естественно, что полученный эффект зависит от линейных размеров и масс-инерционных характеристик аппарата. Приведем результаты расчетов для пестиного шагающего аппарата ША1 массой 5 т [2] (масса ноги 95 кг, расстояние между точками подвеса к корпусу передних и задних ног 3,4 м).

Рассмотрим энергетически наиболее выгодный режим движения ША1 при скорости 10 км/ч, полученный в [2].

На фиг. 3 показана зависимость средней выходной мощности приводов W (в кВт) ША1 от скорости V (в км/ч) без использования компенсаторов шарнирных моментов (кривая 1) и с использованием компенсаторов шарнирных моментов в шарнирах платформ (кривая 2).

Установка компенсаторов в шарнирах платформ позволяет простыми техническими средствами существенно уменьшить среднюю выходную мощность аппарата (для ША1 при $V = 5$ км/ч с 5,9 до 3,3 кВт или в 1,8 раза, при $V = 10$ км/ч с 30,3 до 9,4 кВт или в 3,2 раза). С ростом скорости движения выигрыш от использования компенсаторов шарнирных моментов возрастает.

Кубический закон увеличения средней выходной мощности приводов аппарата с ростом скорости движения при наличии компенсаторов в шарнирах платформ (кривая 2 на фиг. 3) связан с подъемом стоп переносимых ног над опорной поверхностью. Это движение стоп обеспечивается приводами в шарнирах бедер и колен.

Средняя выходная мощность аппарата при использовании компенсаторов в шарнирах платформ (кривая 2 на фиг. 3) определена в предположении, что КПД компенсаторов η равен единице. В силу потерь энергии в реальных конструкциях $\eta < 1$, а выигрыш от использования компенсаторов уменьшается по сравнению с рассчитанным пропорционально η .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Кугушев Е. И., Ярошевский В. С.* Расчет динамических параметров движения шагающего аппарата на ЭВМ.— В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982, с. 72—77.
2. *Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Лапшин В. В.* Энергетика движения шестинового шагающего аппарата.— В кн.: Информационные и управляющие системы роботов. М.: Изд-е Ин-та прикл. математики АН СССР, 1982, с. 8—19.
3. *Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 340 с.
4. *Акинфиев С. С., Бабицкий В. И., Крупенин В. Л.* Манипуляционные системы резонансного типа.— *Машиноведение*, 1982, № 1, с. 3—8.

Москва

Поступила в редакцию
25.IX.1985