УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-74-79

*Н. Г. Шаронов***О ВЛИЯНИИ ПОХОДКИ НА ТЯГОВУЮ ДИНАМИКУ
ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ*****Волгоградский государственный технический университет**

sharonov@vstu.ru

Рассмотрен метод исследования влияния походки движителей, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью, на энергетические характеристики двигателей мобильного робота.

Ключевые слова: походка, мобильный робот, показатель эффективности.

*N. G. Sharonov***ON THE INFLUENCE OF GAIT ON TRACTION DYNAMICS
OF WALKING ROBOTS****Volgograd State Technical University**

A research method of the effect gait of movers, discretely interacting with the supporting surface, on the energy characteristics of mobile robot motors is considered.

Keywords: gait, mobile robot, efficiency indicator.

В одной из первых отечественных работ, обобщающих проблемы создания шагающих роботов [1], обращается внимание на значимость такой характеристики движения как походка, влияющая на распределение реакций опорной поверхности между движителями. Для многоногих шагающих роботов с различными типами движителей под походкой понимается последовательность взаимодействия движителей с опорной поверхностью и отрыва от нее для осуществления переноса в новое положение. Такая последовательность дополняется расписанием, характеризующем время перехода из одного состояния последовательности в другое. Существует достаточно полная классификация походок [2, 3, 4, 5], в которой учитываются геометрические и кинематические характеристики движения. Известны исследования о влиянии походки на статическую устойчивость шагающих роботов [6, 7], а также постановки задач о курсовой устойчивости при различных походках и синхронизации работы движителей, приводящих к изменению походок [8–10]. Причем рассматривались только регулярные походки со сдвоенными механизмами шагания, образующих движитель [11, 12]. Особенностью рассмотренных шагающих роботов является то, что у всех реализуется одинаковый шаг, одинаковый коэффициент режима, и в опоре находится одинаковое количество

движителей. Попытка применения дополнительных подъемных движителей [13] для управления походкой показывает их ограниченную эффективность и только при преодолении препятствий. Однако исследований о влиянии походки на устойчивость программного движения робота или на его энергетические характеристики, влияющие на выбор двигателей, недостаточно.

Изучается поступательное движение шагающего робота с N движителями, приводимыми в движение независимыми приводами. При нахождении в фазе опоры с грунтом стопы всех движителей имеют одинаковую относительную горизонтальную скорость, однако коэффициент режима j -го движителя γ_j [2] при одинаковом общем периоде движения движителя T индивидуален. Поэтому походка задается временем начала переноса каждого j -го движителя τ_j и временем его окончания τ_j^* . Причем время окончания переноса τ_j^* одновременно является временем начала взаимодействия с грунтом. Например, для четырехдвигательного робота (статическая устойчивость не рассматривается) ее удобно представить в виде диаграммы (рис. 1), отличие которой от известных [2] состоит в различном времени нахождения каждого движителя в опорной фазе или фазе переноса.

© Шаронов Н. Г., 2021.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-41-340013).

Рис. 1. Диаграмма работы двигателей:
I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII – фазы одинакового состояния двигателей

Между параметрами походки τ_j^* , τ_j , γ_j , T имеется связь:

$$\tau_j^* - \tau_j = \begin{cases} T(1 - \gamma_j), & \text{если } \tau_j^* > \tau_j \\ -T\gamma_j, & \text{если } \tau_j^* < \tau_j \end{cases} \quad (1)$$

Если расположить все τ_j , τ_j^* в порядке возрастания

$$\bar{\tau}_1 < \bar{\tau}_2 \dots < T, \quad (2)$$

то на каждом интервале реализуется свой режим работы двигателей.

Например, при $\tau_2 < t < \tau_3^*$ второй и третий двигатель находится в фазе переноса, а первый и четвертый – в фазе взаимодействия с грунтом. При $\tau_3^* < t < \tau_1$ в фазе переноса находится только один второй двигатель, а первый, третий и четвертый – в фазе взаимодействия с грунтом. Причем каждый двигатель в фазе переноса в новое положение перемещается на одно и то же расстояние $l = V_0 T$, но за разное

время $\tau_j^* - \tau_j$. Различное время они находятся и в фазе взаимодействия с грунтом.

Принимается гипотеза, что нагрузка Q , равная силе сопротивления движению [14] на все двигатели, находящиеся в фазе опоры, распределяется равномерно. Правомочность такой гипотезы обеспечивается системой управления приводами. В этом случае диаграмма нагрузок для четырехдвигательного робота на каждом из восьми этапов имеет вид, представленный ниже в таблице.

Но могут быть и другие принципы, на основе которых строится система управления двигателями. Например, для двигателей на основе сдвоенных механизмов шагания с управляемой скоростью перемещения их стоп относительно грунта, но не управляемых усилий приводит к тому, что при подъеме одной стопы тяговая сила на этом двигателе уменьшается до нуля, но одновременно новая стопа реализует одинаковую совместно с другими двигателями дополнительную тяговую силу, зависящую от одинаковой дополнительной деформации грунта под стопами [14].

Распределение нагрузки на двигатели в соответствии с рис. 1

№ этапа	Время этапа	Номер двигателя			
		1	2	3	4
1	$0 < t < \tau_3$	$Q/3$	$Q/3$	$Q/3$	0
2	$\tau_3 < t < \tau_4^*$	$Q/2$	$Q/2$	0	0
3	$\tau_4^* < t < \tau_2$	$Q/3$	$Q/3$	0	$Q/3$
4	$\tau_2 < t < \tau_3^*$	$Q/2$	0	0	$Q/2$
5	$\tau_3^* < t < \tau_1$	$Q/3$	0	$Q/3$	$Q/3$
6	$\tau_1 < t < \tau_2^*$	0	0	$Q/2$	$Q/2$
7	$\tau_2^* < t < \tau_4$	0	$Q/3$	$Q/3$	$Q/3$
8	$\tau_4 < t < T$	0	$Q/2$	$Q/2$	0

На диаграммах (рис. 2) представлены зависимости тяговых усилий для каждого из механизмов шагания при рассмотренном частном случае управления приводами курсового движения.

Рис. 2. Диаграммы зависимостей усилий, развиваемых приводами шагающих машин:

$\tau_1 = 19$ с; $\tau_2 = 11$ с; $\tau_2^* = 23$ с; $\tau_3 = 3$ с; $\tau_3^* = 13$ с; $\tau_4 = 25$ с; $\tau_4^* = 8$ с; $T = 30$ с; Q – сила сопротивления движению

В общем случае диаграммы могут иметь и другой вид, отличающийся друг от друга количеством и продолжительностью характерных этапов. На каждом из этапов и развиваемые усилия могут иметь различный характер. Это зависит от количества движителей и принципов, закладываемых в систему управления по реализации походки и тяговых усилий [15, 16].

Рассматриваются шагающие роботы, имеющие N механизмов шагания с одинаковой длиной шага. Ставится задача определения походки, задаваемой в пределах периода T системой значений времени τ_j , τ_j^* – начала и конца переноса стопы механизма шагания. На каждом из этапов взаимодействия с опорной поверхностью определено тяговое усилие j механизма шагания F_j , обеспечиваемое работой привода курсового движения.

На тяговые усилия накладываются условия:

$$F_j \leq fN_j, \quad (3)$$

где N_j – нормальная реакция под стопой движителя и на каждом этапе (промежутке времени Δt), где не происходит изменение количества механизмов шагания, взаимодействующих с грунтом.

$$\sum_{j=1}^N F_j = Q, \quad (4)$$

где Q – сила сопротивления движению [8, 9, 14].

Условие (4) основано на исследовании поступательного равномерного движения робота и равенстве нулю среднего значения главного вектора сил инерции, действующих на переносимые механизмы шагания за один период T движения.

$$\begin{aligned} A_1 &= \alpha_1 \frac{141}{36} Q^2; \quad A_2 = \alpha_2 \frac{122}{36} Q^2; \quad A_3 = \alpha_3 \frac{125}{36} Q^2; \quad A_4 = \alpha_4 \frac{98}{36} Q^2; \\ A &= \sum A_j = Q^2 (3.916\alpha_1 + 3.38\alpha_2 + 3.47\alpha_3 + 2.72\alpha_4); \\ F_1 &\approx 0.25Q; \quad F_2 \approx 0.255Q; \quad F_3 \approx 0.272Q; \quad F_4 \approx 0.222Q. \end{aligned}$$

Поэтому алгоритм расчета оптимального распределения усилий между движителями основывается на определении минимума комплексного критерия, состоящего из перечисленных выше показателей [17].

На графике рис. 3 представлены зависимо-

сти показателей критерия оптимальности выбора походки и значений тяговых усилий F_j для двигателей постоянного тока рассматриваются:

$$\begin{aligned} A_j &= \int_0^T \alpha_j F_j^2 dt, \\ A &= \sum A_j = \sum \int_0^T \alpha_j F_j^2 dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Первый показатель (5) определяет уровень тепловых потерь в j -м двигателе, а второй – суммарный уровень тепловых потерь.

Для двигателей внутреннего сгорания [18]

$$A = \sum \int_0^T (\alpha_j F_j^3 + \beta_j F_j^2 + \gamma_j F_j + \delta_j) dt, \quad (6)$$

где α_j , β_j , γ_j , δ_j – постоянные, характерные для конкретного двигателя с учетом передаточного числа приводов;

– минимум средней силы $\bar{F}_j$, развиваемой j приводом

$$\bar{F}_j = \frac{1}{T} \int_0^T F_j dt; \quad (7)$$

– минимум среднеквадратического отклонения тягового усилия от силы сопротивления движению

$$I = \sum_{j=1}^N \int_0^T \left(F_j - \frac{Q}{N} \right)^2 dt. \quad (8)$$

Так, например, для шагающего робота с походкой, представленной на диаграмме (рис. 2)

сти показателя уровня тепловых потерь от времени вступления в контакт с опорной поверхностью первого и четвертого движителей при сохранении всех остальных параметров походки, соответствующих значениям, указанным на рис. 2.

Рис. 3. Зависимость показателя уровня тепловых потерь ($Q=1$ кН):
1 – первый движитель; 2 – четвертый движитель

Среднее усилие, развиваемое каждым приводом при параметрах походки в соответствии с рис. 3, в зависимости от времени вступления

в контакт с опорной поверхностью первого движителя представлено на графиках рис. 4.

Рис. 4. Среднее усилие, развиваемое каждым приводом (номер зависимости соответствует номеру движителя)

Предложены показатели, оценивающие эффективность работы приводов мобильных роботов с двигателями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью.

Разработан метод оценки влияния походки на показатели эффективности движения роботов с двигателями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболевский, И. И. Некоторые проблемы создания шагающих машин / И. И. Артоболевский, Н. В. Умнов // Вестн. АН СССР. – 1969. – № 2. – С. 44–51.
2. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука. Физматлит, 1984. – 312 с.

3. Лапшин, В. В. Управление движением четырехного аппарата, перемещающегося рысью, иноходью и галопом / В. В. Лапшин // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1985. – № 5. – С. 39–45.
4. Бессонов, А. П. К вопросу о систематике походок шагающих машин / А. П. Бессонов, Н. В. Умнов // Машиноведение. – 1975. – № 6. – С. 23.
5. Song Shin-Min, Waldron Kenneth J. Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle: MIT Press series in artificial intelligence. 1989. 314 p. ISSN 2691-8951.
6. Лапшин, В. В. Об устойчивости движения шагающих машин / В. В. Лапшин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 6. – С. 319–335.
7. О статически устойчивой походке шагающей машины с тремя сдвоенными ортогонально-поворотными двигателями / Е. С. Брискин, А. В. Малолетов, А. М. Колесов, В. А. Серов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 7. – С. 22–27.

8. Брискин, Е. С. Об общей динамике и повороте шагающих машин / Е. С. Брискин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 33–39.
9. Брискин, Е. С. Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движителями / Е. С. Брискин, В. М. Соболев // Проблемы машиностроения. – 1990. – № 3. – С. 28–34.
10. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных походках шагающих роботов / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин // Экстремальная робототехника. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 146–150.
11. Шагающая машина «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов, К. В. Шаров, Н. Е. Фролова, Д. Н. Покровский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 48–49.
12. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 1. Концепция проектирования / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 5. – С. 22–27.
13. Брискин, Е. С. Об управлении походкой шагающей машины «Восьминог» / Е. С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 6–10.
14. Брискин, Е. С. Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 48–54.
15. Шнейдер, А. Ю. Управление опорными реакциями шагающего аппарата при движении по грунтам с различными несущими свойствами / А. Ю. Шнейдер, Д. М. Гориневский. – Препр. – М. : ИППИ, 1986. – 72 с.
16. Брискин, Е. С. Учет нелинейных механических эффектов при построении оптимальных законов управления шагающими роботами / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин // В кн. : 10-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017). Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции : в 3 т. / отв. ред. И. А. Каляев. – 2017. – С. 26–28.
17. Об оценке эффективности шагающих роботов на основе многокритериальной оптимизации их параметров и алгоритмов движения / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, В. А. Шурыгин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 2 (март – апрель). – С. 168–176.
18. Брискин, Е. С. Об оценке эффективности цикловых механизмов / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2017. – № 2 (март – апрель). – С. 13–19.