М. В. Мирошкина

**ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ЗАКОНЕ ПЕРЕНОСА СТОПЫ
ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ПРИ ПРЕОДОЛЕНИИ ПРЕПЯТСТВИЯ***

Волгоградский государственный технический университет

mariatiminen@yandex.ru

Решается задача о переносе шагающих движителей подводных мобильных роботов. Определяются оптимальные режимы их переноса, зависящие от геометрических характеристик профиля дна. В качестве критерия оптимальности вводится комплексный показатель, аддитивно зависящий от системы частных показателей.

Ключевые слова: подводный мобильный робот, шагающие машины, оптимальные режимы движения, энергоэффективность.

М. V. Miroshkina

**ON THE OPTIMAL LAW OF THE FOOT TRANSFER
OF THE WALKING PROPULSION DEVICES WHEN OVERCOMING AN OBSTACLE**

Volgograd State Technical University

The problem of walking machine leg transfer is being solved. Optimal laws of transfer are determined with regards to geometrical features of ground underwater. Complex optimality criterion is introduced as sum of indexes of quality of the movement multiplied each by weight coefficients.

Keywords: underwater mobile robot, walking machines, optimal driving modes, energy efficiency.

Введение

Появление новых задач, решаемых с помощью мобильных роботов, и их разнообразие

вызывает необходимость совершенствования конструкций и систем управления, в том числе наземных роботов с шагающими движителями.

© Мирошкина М. В., 2021.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90112.

Зачастую, применение роботов с традиционными колесными или гусеничными движителями затруднено в связи со сложным рельефом участка местности. Для решения данных задач целесообразно применение мобильных роботов, использующих для движения принцип шагания. Такие роботы обеспечивают более бережное взаимодействие с грунтом, бесконтактное преодоление препятствий, отсутствие непрерывной колеи, что позволяет управлять положением точки касания с грунтом при движении. Более широкому распространению шагающих мобильных роботов препятствуют большие энергозатраты на перемещение, а также повышенные динамические нагрузки.

Анализ проведенных исследований [1–5] показывает, что имеется значительный потенциал применения шагающих машин в специальных условиях, когда они превосходят по эффективности традиционные колесные и гусеничные транспортные средства. В первую очередь это обусловлено эффективностью применения шагающих машин для перемещения по неорганизованной поверхности, в том числе при наличии на пути следования машины зон, запрещенных к наступанию. Все эти свойства обеспечивают возможность эффективного применения шагающих машин на сложно пересеченных местностях, в сельском хозяйстве, в военном деле, при ликвидации последствий техногенных и природных катастроф, для исследования поверхности планет и др.

Особенности движения шагающих машин позволяют использовать их там, где применение машин с другими типами движителей становится невозможным или нецелесообразным. Исследованиями шагающих машин занимаются во всем мире, в первую очередь в развитых странах, таких как США, Германия, Япония, Россия и т. д. Большинство исследований направлены на построение и изучение движения зооморфных, инсектоморфных, антропоморфных шагающих роботов, роботов с ортогональными и цикловыми движителями, особенностей их походок, различных режимов движения и конструкций. Роботы с ортогональными движителями обладают рядом преимуществ, среди которых независимость вертикального и горизонтального движения опорной стопы, что позволяет упростить систему управления и обеспечить движение без дополнительных затрат энергии на поддержание веса аппарата. К недостаткам можно отнести значительные габариты движителей.

Обзор и анализ существующих методов переноса стопы мобильных роботов с шагающими движителями по неровному грунту при преодолении препятствий

Для реализации адаптации к опорной поверхности, включая преодоление препятствия, постановку опоры механизма шагания в заданную точку, шагающий движитель должен содержать, по крайней мере, две управляемых степени свободы. Среди таких движителей наиболее широко применяются ортогональная, пантографная, «инсектоморфная», «зооморфная» («лошадиная») и «антропоморфная» схемы.

У каждого типа шагающего робота есть свои особенности переноса стопы, обусловленные типами приводов. Например, для инсектоморфного шагающего движителя (рис. 1) координаты опорной точки в системе координат, связанной с корпусом робота, определяются выражениями (1). При этом адаптация к опорной поверхности обеспечивается согласованным движением трех приводов, что усложняет систему управления робота

$$\begin{cases} x_H = \left[l_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \sin \left(\varphi_3 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sin \varphi_1 \\ y_H = \left[l_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \sin \left(\varphi_3 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos \varphi_1 \\ z_H = l_2 \sin \varphi_2 - l_3 \cos \left(\varphi_3 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Управляющими параметрами являются углы φ_1 , φ_2 , φ_3 . Основным недостатком таких механизмов является наличие энергозатрат на поддержание веса робота в процессе движения.

На рис. 2 показан вариант траектории движения опорной точки шагающего робота в фазе переноса относительно корпуса робота, предложенный Н. В. Умновым. Вид данной траектории переноса шагающего движителя объясняется необходимостью организовывать взаимодействие стоп движителей с опорной поверхностью без горизонтального проскальзывания по ней в отсутствие информации об ее профиле. Согласованная работа приводов адаптации и переноса обеспечивает подъем стопы в вертикальном направлении до максимального (или заданного) уровня H , перенос стопы в горизонтальном направлении и вертикальное опускание стопы до соприкосновения с поверхностью. Такой вид траектории движения опорной точки шагающего робота подходит для любого типа шагающего движителя.

Рис. 1. Пример расчета кинематических характеристик движения опорной точки инсектоморфного движителя:
1–3 – звенья механизма; 4 – корпус машины

Закономерности энергетически эффективных режимов движения шагающих машин при перемещении по неровному грунту целесообразно устанавливать на примере шагающих роботов с ортогональными движителями. В ортогональных механизмах шагания на перенос стопы задействованы два привода. Приводы

вертикального подъема звена и горизонтального перемещения независимы между собой, что позволяет обеспечить движение по такой траектории, которая будет соответствовать минимальному уровню энергозатрат на перемещение стопы шагающего робота при преодолении препятствия.

Рис. 2. Вариант траектории движения стопы, предложенный Н. В. Умновым:
1 – в относительной системе координат, связанной с корпусом робота;
2 – в абсолютной системе координат, связанной с неподвижным объектом

На рис. 3 представлен вариант решения задачи переноса стопы при движении в горизонтальном направлении (по Я. В. Калинину) с учетом критерия минимума тепловых потерь в приводном двигателе за счет рекуперации энергии. В той фазе цикла шага, когда требуется уско-

ренное движение переносимой стопы, корпус машины перемещается замедленно (кривая 1). Перераспределение кинетической энергии осуществляется от корпуса к ускоренно движущемуся механизму шагания (кривая 2) и аналогично в обратном направлении при его замедлении.

Рис. 3. Зависимости горизонтальных скоростей корпуса шагающей машины и опорной точки от времени в фазе переноса:
1 – абсолютная горизонтальная скорость машины ($V_{cp} = 1,5$ м/с);
2 – абсолютная горизонтальная скорость опорной точки в фазе переноса

В работах С. А. Устинова рассматривается задача синтеза программного движения привода адаптации ортогонального шагающего движителя, обеспечивающего минимум критерия оптимальности (2), состоящего из следующих показателей: энергетические затраты на перемещение (3), комфортабельность как безударность взаимодействия с опорной поверхностью (4), увеличение тягово-сцепных свойств при переступании (5). Математическая модель динамики привода адаптации основывается на расчетной схеме, которая описывает поступательное перемещение выдвижных частей опорной стойки и опоры ортогонального шагающего движителя (рис. 4).

Рис. 4. Расчетная схема привода вертикального движения:
1 – корпус робота; 2 – выдвижная часть движителя; 3 – опора движителя; u – средняя скорость курсового движения машины; L – расстояние до грунта, определяемое информационно-измерительной системой адаптации с некоторой погрешностью ΔL

$$I = \sum_{j=1}^3 k_j H_j \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$H_1 = \frac{\alpha}{mgL} \int_0^{\tau} (m\ddot{x} \mp mg)^2 dt, \quad (3)$$

$$H_2 = \frac{1}{2gL\tau} \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau} \dot{x}^2 dt, \quad (4)$$

$$H_3 = -\frac{1}{2gL\tau} \int_0^{\Delta\tau} \dot{x}^2 dt. \quad (5)$$

Для режима движения привода адаптации ортогонального шагающего движителя вводится комплексный критерий качества движения, состоящий из безмерных показателей H_1 , H_2 , H_3 , характеризующих соответственно энергетическую эффективность, комфортабельность движения и тягово-сцепные свойства режима.

На рис. 5 представлен вид возможной траектории переноса стопы движителя (кривая 3), которая отличается от предложенной Н. В. Умновым тем, что построена с учетом наличия данных о профиле опорной поверхности, полученных с помощью информационно-измерительной системы, и обеспечивает оптимальность критерия движения стопы с ее подъемом и опусканием на опорную поверхность при наличии препятствий.

При наличии достаточно большого числа публикаций по динамике движения шагающих роботов отсутствуют исследования режимов движения шагающих машин с изучением одно-временного движения стопы шагающего движителя в горизонтальном и вертикальном направлениях при переносе его в новое положение.

Также не рассматривалась задача и об определении оптимального, по тому или иному критерию, движения стопы с ее подъемом и опус-

канием на опорную поверхность при наличии препятствий.

Рис. 5. Вид возможной траектории переноса стопы движителя:

1 – профиль опорной поверхности; 2 – абсолютная траектория по Н. В. Умнову; 3 – возможная траектория

Следовательно, актуальными являются разработка и исследование методов определения таких режимов движения шагающих машин, которые позволят обеспечить как преодоление препятствий и безударное взаимодействие переносимой стопы с опорной поверхностью, так и минимальный уровень энергетических затрат на движение шагающей машины по поверхности с препятствиями.

Выводы

Принцип шагания обладает тем главным достоинством, что дает возможность осуществлять бесконтактное преодоление препятствий. Применение современных информационно-измерительных средств позволяет обнаружить и идентифицировать как препятствия, стоящие на пути, так и оценить закон переноса стопы и само место, куда предполагается осуществить постановку стопы. При использовании этих данных в качестве исходных, существует возможность определить закон оптимального переноса стопы по выбранному или заданному критерию. Причем критерий может состоять из нескольких показателей, порою и противоречивых. Важнейшие из них – уровень тепловых потерь в приводных двигателях, что является определяющим для коэффициента полезного действия (КПД) привода; и (или) среднеквадра-

тические ускорения движителей при переносе, что влияет на комфортабельность движения; максимальное усилие, развиваемое приводами, от чего, при известной скорости движения, зависит выбор двигателя и трансмиссии. При равномерном движении корпуса мобильного робота за счет выбора оптимального режима переноса стопы можно существенно снизить эти показатели. Это особенно важно для подводного мобильного робота. Важность такой задачи обусловлена гораздо большими силами сопротивления движению, поэтому она становится особенно актуальной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных режимах движения мобильных роботов с ортогональными шагающими движителями при преодолении препятствий / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, М. В. Мирошкина // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 2. – С. 75–82.
2. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, В. В. Чернышев // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2014. – № 1. – С. 18–25.
3. 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 Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 2. – С. 168–176.

4. Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, В. А. Серов, С. А. Устинов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 184–190.

5. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170–176.