

УДК 621.865.8(031)

М. Н. Полищук

ПЕДИПУЛЯТОР РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация: Рассматривается решение задачи повышения энергетической эффективности роботов вертикального перемещения путем рекуперации энергии перемещения на каждом полцикле движения педипуляторов робота. Предложенное решение позволяет увеличить удельную мощность робота, и тем самым, создать резерв мощности для технологических нагрузок.

Ключевые слова: шагающие роботы, педипуляторы вертикального перемещения, рекуперация энергии.

Вступление

Роботы вертикального перемещения являются относительно новой модификацией мобильных роботов, оснащенных захватами для удержания робота на вертикальной или иной произвольной ориентации поверхности. Указанные захваты размещаются на, так называемых педипуляторах – шагающих механизмах, или непосредственно на корпусе робота, если последний оснащен колесной трансмиссией. Главной особенностью проектирования роботов данного типа есть необходимость учета дестабилизирующей гравитационной составляющей в совокупности динамических нагрузок. Это объясняется тем, что относительно традиционных мобильных роботов гравитационная сила оказывает содействие стабилизации их передвижению, а в случае роботов вертикального перемещения – наоборот, нуждается в ее преодолении с целью гарантированного удержания робота на произвольно ориентированной поверхности перемещения.

Необходимость создания указанных роботов, а также их комплексов, обуславливается повышенными требованиями к выполнению технологических операций в условиях экстремальных ситуаций, опасных для пребывания человека или невозможности выполнения им технологических воздействий на объекты окружающей среды: от выполнения операций мониторинга до монтажа или демонтажа промышленных конструкций.

Анализ исследований и публикаций

Основы моделирования роботов вертикального перемещения (РВП) достаточно широко изложены в работах [1, 2, 3], однако без решения задачи рекуперации энергии перемещения. Технические решения [4, 5, 6] способствуют час-

© М. Н. Полищук

точной экономии энергозатрат, либо за счет импульсного механизма подъема опор, либо посредством применения, так называемых, копирных подпружиненных механизмов. Однако, поскольку сила инерции должна быть пропорциональна усилию подъема, а значит и размеру инертной массы, последнее приводит к увеличению веса всего педипулятора, следовательно, и к возрастанию необходимой мощности приводов горизонтального перемещения, т.е. к росту энергетических затрат. Поэтому задача сокращения энергетических затрат движения РВП остается по-прежнему актуальной.

Постановка задачи

Исходные данные. На рис. 1 представлена кинематическая схема РВП с указанием действующих на педипуляторы сил и моментов, а именно: mg – гравитационной составляющей, N_m (где: m – масса робота, кг; g – ускорение свободного падения); M_1, M_2 – крутящих моментов на валу приводов первой и второй пары педипуляторов, N_m ; j – жесткости упругих элементов для накопления потенциальной энергии (Н/м).

Необходимо определить: F_1, F_2 – переменные движущие силы приводов, соответственно на первом полцикле перемещения, т.е. на этапе X_1 (см. рис. 1) и на втором полцикле перемещения X_2 , т.е. на этапе рекуперации энергии движения; J – усилие упругого элемента (Н), необходимое для перемещения робота при выключенном приводе, а также условие сцепления робота с поверхностью перемещения.

Для решения поставленной задачи используем метод кинестатики, основанный на принципе Д'Аламбера (или точнее на принципе Германа–Эйлера–Д'Аламбера) – формальный прием, дающий возможность записать уравнения движения в виде уравнений равновесия. Принимая во внимание конструктивную новизну педипуляторов РВП, первоначально рассмотрим принцип его работы.

Принцип работы педипуляторов

Согласно новому принципу в первой половине цикла перемещения педипуляторов за счет деформации упругих элементов накапливают их потенциальную энергию, которую используют в качестве кинетической энергии перемещения во второй половине цикла, при этом поочередно включают сцепление с поверхностью перемещения захватов, накапливающих энергию, и отключают сцепление с указанной поверхностью движущихся захватов педипулятора.

В исходном положении включено сцепление с поверхностью перемещения первой пары захватов 1 и 2 (если эти захваты выполнены в виде вакуумных присосов, то в них создается вакуум; при этом тип захватов: электромагнитный, механический, адгезионный – принципиального значения не имеет). Другая пара захватов 3 и 4 при этом отключена. На схеме включенные захваты затушеваны, а отключенные – нет.

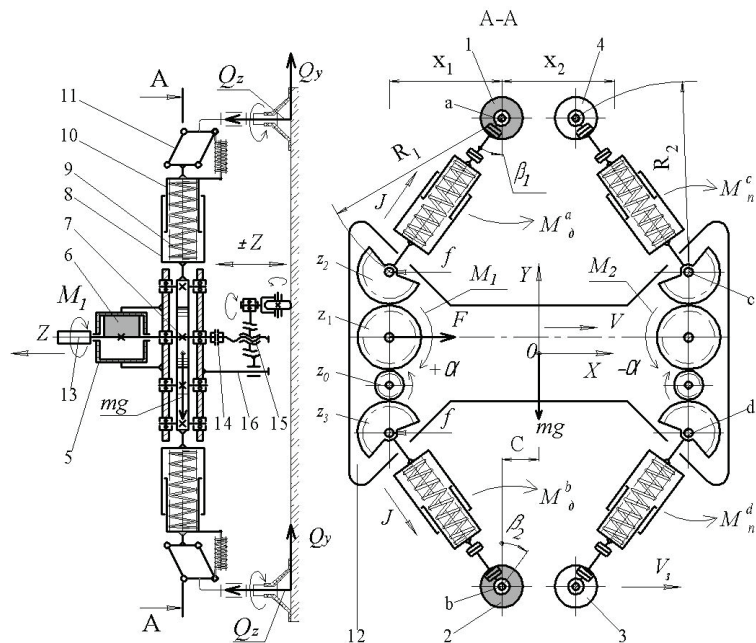


Рис. 1. Кинематическая схема робота вертикального перемещения с рекуперацией энергии движения

По команде системы управления в одну из полостей шиберного пневматического привода 5 педипуляторов, несущих включенные захваты 1 и 2, подается энергоноситель (в данном случае это сжатый воздух) и шибер 6 поворачивает зубчатое колесо Z_1 на определенный угол $+\alpha$ (на рис. 1 – по часовой стрелке). А в другом, таком же приводе (см. сечение А-А), как и привод 5, но уже для пары педипуляторов, несущих захваты 3 и 4, сжатый воздух подается в противоположную полость. В результате такое же зубчатое колесо, как и Z_1 , но входящее в кинематическую цепь пары педипуляторов, несущих захваты 3 и 4, поворачивается в противоположную сторону на угол $-\alpha$ (на рис. 1 – против часовой стрелки).

Иначе говоря, привод пары педипуляторов, несущих включенные захваты 1 и 2, и привод другой пары педипуляторов, несущих выключенные захваты 3 и 4, работают в противофазе. При этом зубчатое колесо Z_1 через вал 7 привода 5 поворачивает непосредственно сектор Z_2 против часовой стрелки, а сектор Z_3 через паразитную шестерню Z_0 – по часовой стрелке. Зубчатый сектор Z_2 совершает движение обкатки по колесу Z_1 , а сектор Z_3 такое же движение по шестерне Z_0 .

Вследствие того, что захваты 1 и 2 включены, т.е. находятся в состоянии сцепления с вертикальной поверхностью перемещения робота, а секторы Z_2 и Z_3 жестко связаны с соответствующими внешними звеньями 8 телескопических механизмов педипуляторов, несущих захваты 1 и 2, происходит сжатие упругих элементов 9 относительно внутренних элементов 10. Звенья 8 и 10, образующие телескопический механизм, совместно с шарнирными параллелограммами 11 поворачиваются по радиусу R_1 вокруг соответствующих осей «а» и «b» захватов 1 и 2. Эти движения вызывают продольное перемещение корпуса 12 до положения первого полуцикла движения, т.е. корпус 12 робота проходит дистанцию X_1 первого полуцикла своего движения. Это состояние соответствует максимальному сжатию упругих элементов 9, а значит и максимуму накопленной потенциальной энергии.

После пересечения звеньями Z_1 , Z_2 и Z_3 линии центров «а» – «b» не более чем на пять – шесть угловых градусов, что фиксируется инкодером 13, привод 5 отключают и дальнейшее движение корпуса 12 робота на дистанцию X_2 – второго полуцикла движения, происходит под действием усилия упругих элементов 9.

Одновременно с описанным перемещением пары педипуляторов, соединенных с включенными захватами 1 и 2, происходит перемещение педипуляторов, соединенных с выключенными захватами 3 и 4. Поскольку приводы указанных пар педипуляторов работают в противофазе, то приводное зубчатое колесо, аналогичное колесу Z_1 , поворачивается, как отмечено выше, в противоположную сторону на угол $-\alpha$, что приводит к повороту педипуляторов, несущих отключенные захваты 3 и 4 по радиусу R_2 , но уже вокруг соответствующих их зубчатым секторам центров «с» и «d».

Если корпус 12 робота за полный цикл перемещается на длину пути, равную $X_1 + X_2$, то выключенные (т.е. свободные от сцепления с поверхностью перемещения) захваты 3 и 4, вследствие одновременного перемещения и корпуса 12 и соответствующих им педипуляторов, проходят двойную дистанцию, а именно: $2(X_1 + X_2)$. Поскольку упругие элементы 9 педипуляторов, несущих захваты 3 и 4, не деформируются, то отключенные от сцепления захваты движутся

по дуге радиусом R_2 . Поэтому имеет место условие $R_2 > R_1$. По завершению второго полуцикла перемещения (на длину пути X_2) включается сцепление захватов 3 и 4 с поверхностью перемещения, а затем отключается сцепление захватов 1 и 2. Далее цикл продольного перемещения повторяется.

Одновременно с указанными продольными перемещениями корпуса 1 робота осуществляется, в зависимости от вида препятствия, его подъем или опускание. Происходит это следующим образом.

При включенной управляемой муфте 14 приводной вал 7 неполноповоротного пневмопривода 5 сообщает вращение ходовому винту дифференциального винтового механизма 15. Поскольку внешняя гайка последнего совершает поступательное движение по направляющей 16 и соединена со свободно вращающейся опорой, то в зависимости от направления вращения шибера 6 происходит подъем или опускание корпуса 12 мобильного робота. Наличие дифференциального винтового механизма позволяет за определенный угол поворота шибера 6 получить больший (удвоенный при равенстве шагов гаек) ход подъема или опускания корпуса 12, а именно величина указанного хода составляет: $H = S_1 + S_2$; где: H – величина перемещения гайки винтового механизма; S_1 – шаг внутренней гайки; S_2 – шаг наружной гайки дифференциального винтового механизма 15. Соединение педипуляторов с захватами посредством шарнирного параллелограмма 11 позволяет корпусу 12 при его подъеме и опускании совершать плоскопараллельное движение при включенном сцеплении с поверхностью любой из пар захватов.

При необходимости изменения маршрута передвижения мобильного робота, т.е. осуществления его поворота, включаются и выключаются захваты сцепления с поверхностью перемещения, расположенные по диагонали относительно корпуса 12. Так, применительно к изображению на рис. 1 при включении захватов 1 и 3 и выключении захватов 2 и 4, при срабатывании привода 5 происходит поворот корпуса 12 против часовой стрелки, и, наоборот: при включенном сцеплении захватов 2 и 4 и выключенном сцеплении захватов 1 и 3 – поворот по часовой стрелке. Это объясняется тем, что при указанных комбинациях включения захватов, вокруг центра масс «0» корпуса 12 возникает соответственно направленный крутящий момент.

Таким образом, благодаря перемещению корпуса робота во втором полуцикле движения за счет накопленной энергии деформации упругих элементов в первом полуцикле, а также вследствие отсутствия в необходимости отдельных приводов подъема–опускания и поворота робота, достигается не только эконо-

мия энергозатрат, но и упрощение конструкции. Последнее свойство имеет доминирующее значение особенно для мобильных роботов, совершающих движение по вертикальной или наклонной поверхности, т.к. мощность приводов захватов сцепления педипуляторов с поверхностью перемещения непосредственно зависит как от массы самого робота, так и от величины полезной нагрузки, определяемой грузоподъемностью робота или усилиями выполнения какой-либо технологической операции.

Динамические нагрузки педипуляторов

Движущая сила педипуляторов:

$$F = F_1 + F_2 \quad (1)$$

где: F_1 и F_2 – переменные движущие силы приводов, соответственно на первом полуцикле перемещения, т.е. на этапе X_1 (см. рис. 1) и на втором полуцикле перемещения, т.е. на этапе X_2 .

На этапе X_1 накопления энергии движущая сила равна:

$$F_1 = 2 \left[\left(\frac{M_i i}{R_1 \cos \beta_1^{\max}} \right) - 2f \right] \quad (2)$$

где: i – передаточное отношение трансмиссии привода педипулятора, $i = z_2/z_1$ (z_1, z_2 – число зубьев соответственно ведущего и ведомого звеньев редукции); β_1 – угловой ход (поворот) оси педипулятора, град, $0 \leq \beta_1 \leq \beta_1^{\max}$ (здесь значения $\beta_1 = 0$ и $\beta_1 = \beta_1^{\max}$ соответствуют началу и окончанию поворота оси педипулятора); f – сила сопротивления движению (Н): $f = J \mu \cos \beta_1$, где: μ – приведенный коэффициент трения механизмов педипулятора; J – переменное усилие упругого элемента, Н:

$$J = P_{\min} + jx = P_{\min} + j(R_1 - R_1 \cos \beta_1) = P_{\min} + jR_1(1 - \cos \beta_1) \quad (3)$$

где: P_{\min} – усилие предварительного поджатия (Н), j – жесткость (Н/м) и x – величина деформации упругого элемента (накопителя потенциальной энергии), м.

На этапе X_2 рекуперации энергии при выключенном приводе (т. е. когда $\beta_2^{\max} \geq \beta_2 \geq 0$, а началу и окончанию поворота оси педипулятора соответствуют значения $\beta_2 = \beta_2^{\max}$ и $\beta_2 = 0$) движущая сила равна:

$$F_2 = J \sin \beta_2 = (P_{\min} + jx) \sin \beta_2 = [P_{\min} + jR_1(1 - \cos \beta_2)] \sin \beta_2 \quad (4)$$

где β_2 – угол поворота оси педипулятора на этапе рекуперации энергии.

Из выражения (4) очевидно, что по мере поворота педипуляторов величина деформации x упругих элементов убывает от значения $x = R_1(1 - \cos\beta_2)$ до значения $x = 0$, что означает прекращение движения за счет ранее накопленной энергии. Одновременно с описанными процессами (накопления и рекуперации энергии) происходит перемещение другой пары захватов педипуляторов, отключенных от сцепления с поверхностью перемещения, а именно захватов 3 и 4 (см. рис. 1).

Как отмечено выше, корпус робота за полный цикл перемещается на длину пути, равную $X_1 + X_2$, а выключенные (т.е. свободные от сцепления с поверхностью перемещения) захваты 3 и 4, вследствие одновременного перемещения и корпуса и соответствующих им педипуляторов, проходят двойную дистанцию, а именно: $2(X_1 + X_2)$. При этом упругие элементы педипуляторов, несущих захваты 3 и 4, не деформируются, а значит, отключенные от сцепления захваты движутся по дугам радиусом $R_2 \geq R_1 \cos\beta_1$ с центрами в соответствующих точках «с» и «d» под действием моментов перемещения:

$$M_i^c = M_i^d = M_i i \quad (5)$$

и с линейной скоростью захватов:

$$V_3 = V + \omega R_2 = V + \omega_1 i R_2 \quad (6)$$

где: V – линейная скорость робота, м/с; $V = \omega_1 i R_1 \cos\beta_1$; ω и ω_1 – соответственно угловые скорости поворота захватов, отключенных от сцепления с поверхностью перемещения, и основного привода робота, рад/с. Очевидно, что в отличие от скорости $\omega R_2 = \text{const}$ свободных захватов относительно корпуса робота, скорость робота и захватов в пространстве непостоянна, а зависит от переменной угла поворота $\cos\beta_1$ педипуляторов, сцепленных с поверхностью перемещения.

Сила сцепления каждого вакуумного захвата педипулятора по нормали к поверхности перемещения составляет:

$$Q_z = SK_s(p_a K_a - p_s)K, \text{ (Н)} \quad (7)$$

где: S – площадь, ограниченная внутренним контуром присоса (м^2), $S = \pi d^2 / 4$; $d = (25...100)10^{-3}$ (м) – диаметр зоны вакуума; K_s – коэффициент уменьшения площади присоса вследствие деформации уплотнения ($K_s = 0,95...0,98$); $p_a = 101 \times 10^3$ (Па) – атмосферное давление; $p_s = (70...80) \times 10^3$ (Па) – глубина вакуума внутри камеры; K_a – коэффициент, которым учитывают изменения атмосферного давления ($K_a = 0,9$); K – коэффициент, которым учитывают приток

воздуха в месте контакта уплотнения камеры (присоса) с поверхностью объекта ($K = 0,65...0,85$).

Касательная сила сцепления захвата зависит от шероховатости поверхности перемещения и материала захвата:

$$\text{(Н)} \quad Q_{x,y} = Q_z \mu_n \quad (8)$$

где μ_n – приведенный коэффициент трения скольжения.

Условие сцепления робота с поверхностью перемещения имеет вид

$$\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} > mg \cos\gamma \quad (9)$$

где γ – угол наклона (поворота) продольной оси робота по отношению к горизонту, град.

При автоматическом управлении силой привода движения необходимо учитывать усилие выполнения технологической операции с учетом данных сенсоров, контролирующих силу сцепления, что особенно важно при преодолении препятствий поверхности перемещения. В последнем случае целесообразно регулировать скорость или ускорение. Это позволит находить при экстремальных ситуациях наилучшее соотношение параметров робота вертикального перемещения.

Выводы

1. Интеграция приводов продольного и вертикального перемещения, а также приводов изменения ориентации робота по маршруту с одновременным созданием средств рекуперации энергии приводов, предоставляет возможность существенно уменьшить суммарную удельную мощность, что имеет принципиальное значение для мобильных роботов вертикального перемещения.

2. Предлагаемый подход к управлению приводами педипуляторов РВП позволяет существенно (от 30 % до 40 %) снизить энергопотребление робота, и тем самым, за счет уменьшения необходимой мощности приводов пропорционально уменьшить вес робота, а освободившейся энергетический ресурс направить на повышение эффективности выполнения как транспортных, так и технологических операций, выполняемых роботом.

Список использованных источников

1. Градецкий В. Г. Роботы вертикального перемещения / В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков. – М.: Тип. Мин. образования РФ, 1997. – 223 с.
2. Рачков М. Ю. Системы приводов технологических роботов вертикального перемещения: автореф. дис. ... д.т.н. /М. Ю.Рачков – М.: Институт проблем механики РАН, 1997. – 16 с.
3. Дыщенко В. С. Исследование динамики мобильного робота для перемещения по вертикальным поверхностям: дис. ... к.т.н. / В. С. Дыщенко/ – Курск: КГТУ, 2006. –135 с.
4. Авторское свидетельство СССР № 2068362 МПК В62D57/032. Транспортное средство / заяв. 28.06.1989; опубл. 27.10.1996.
5. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 2, Issue 3, April-May 2014. ISSN 2091-2730. Developments in Wall Climbing Robots: A Review / Raju D. Detha, S. B. Jaju; p. 37, Fig .6.
6. Патент RU 2057046 МПК В 62D 57/032. Мобильный шагающий робот / заяв. 09.03.1992; опубл. 27.03.1996.

УДК 681.5

В. Н. Смолий

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Аннотация. Разработаны вибромеханические и тепловые математические модели электронных аппаратов, которые позволяют учитывать свойства и взаимодействие составляющих типовых элементов замены и моделируют виброустойчивость печатных плат и компонентов в условиях технологического процесса их производства.

Ключевые слова: электронный аппарат, транспортный объект установки, технологический процесс производства, статистическая выборка, метод группового учета аргумента, автоматизированное управление, поддержка принятия решения, лицо принимающее решение.

Введение

Рассматривая компьютерно-интегрированное производство электронных аппаратов, следует отметить, что произвести изделие с заданными параметрами и компоновкой, а тем более отвечающее заданным свойствам качества, надежности и резонансной устойчивости, не просто, хотя эту задачу необходимо решить, к тому же наложив ограничения на качественно-технические характеристики самого процесса производства. До настоящего времени для иерархии электронных аппаратов не сформулирован общий критерий компоновки элементов, позволяющий учесть механические (вибрационные, ударные, резонансные явления и эффекты, возникающих в ходе эксплуатации аппаратуры) воздействия, анализирующий схемотехнические, конструкторские, геометрические, тепловые и др. факторы и позволяющий интеллектуально идентифицировать задачу подстройки под условия эксплуатации электронного аппарата, предвидеть перегрузки и прогнозировать поведение исследуемого объекта во времени. Также отсутствует тенденция системного анализа рассматриваемой проблемы повышения надежности выпускаемого изделия при одновременном выполнении условий минимизации материально-технических затрат на производство. Поэтому разработка и исследование автоматизированной системы управления, решающей поставленные задачи для производства электронного аппарата, является актуальной и одновременно очень сложной [1, 3].

Выделяя в управлении технологическим процессом производства электронного аппарата детерминированную и стохастическую составляющие, следу-

© В. Н. Смолий