

УДК 621.86/.87

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИЖАТИЕМ¹

© 2020 г. А. М. Нунупаров^{а,*}, В. Г. Чашухин^{а,**}

^а МФТИ; ИПМех РАН, Москва, Россия

*e-mail: anunuparov@gmail.com

**e-mail: ketlk@mail.ru

Поступила в редакцию 21.01.2019 г.

После доработки 02.09.2019 г.

Принята к публикации 30.09.2019 г.

Рассматривается система управления адаптивного робота вертикального перемещения. Прижатие робота к поверхности осуществляется аэродинамическим способом при помощи центробежного насоса. Строится математическая модель робота и исследуются условия его равновесия на произвольно ориентированной поверхности. Предлагается алгоритм адаптивного управления аэродинамическим насосом для оптимизации энергопотребления. Полученные результаты проверяются экспериментально.

DOI: 10.31857/S0002338820010102

Введение. Одним из способов фиксации миниатюрных мобильных роботов на вертикальной или наклонной опорной поверхности является аэродинамическое прижатие посредством вакуумного насоса. Преимущество такого вида фиксации — возможность реализации автономности без существенного увеличения массы робота. Различные конструкции роботов с аэродинамическим прижатием проанализированы в [1]. Анализ аэродинамики прижимающего устройства приведен в [2]. В [3] предложено использование робота с аэродинамическим прижатием для исследования поверхности самолетов, робот имеет многозвенную замкнутую структуру, предложен метод перемещения такой конструкции по искривленной поверхности. В [4] проведено исследование динамики подобного робота, имеющего гусеничные движители. Робот с гусеничными движителями, в конструкцию которых встроено устройство аэродинамического прижатия, рассмотрен в [5], условия равновесия робота на наклонной плоскости в [6, 7]. Анализ литературы показал, что для такого типа роботов недостаточно изучены способы обеспечения автономности и вопросы гарантирования равновесия. В настоящей работе приводится описание системы управления робота вертикального перемещения с аэродинамическим прижатием к поверхности. Разработанные алгоритмы обеспечивают равновесие робота и оптимизацию потребления энергии центробежного насоса, обеспечивающего прижатие к поверхности.

1. Конструкция робота. Лабораторный образец малогабаритного робота вертикального перемещения с аэродинамическим прижатием показан на рис. 1, а. На рис. 1, б пояснен принцип прижатия робота к поверхности. Несущая платформа робота 1 имеет круглую форму. На платформе диаметрально противоположно друг другу расположены двигатели постоянного тока 2, так что оси их валов находятся на одной линии, проходящей через центр робота. На валах двигателей закреплены колеса 3, снабженные силиконовыми шинами, которые обладают высоким коэффициентом трения с поверхностью. Благодаря такому расположению колес робот может поворачиваться на месте. В передней и задней частях робота расположены скользящие опоры, имеющие пренебрежимо малый коэффициент трения с поверхностью. Для уменьшения зазора между платформой и поверхностью по краю платформы располагается полиэтиленовая юбка 4. Пространство между платформой робота и поверхностью, по которой он движется, образует камеру разрежения 5, из которой откачивается воздух посредством центробежного насоса, приво-

¹ Работа выполнена по теме государственного задания (номер госрегистрации АААА-А17-117021310384-9) и частично поддержана грантом РФФИ (проект № 18-01-00650 А) и программой Президиума РАН № 7 “Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники”.

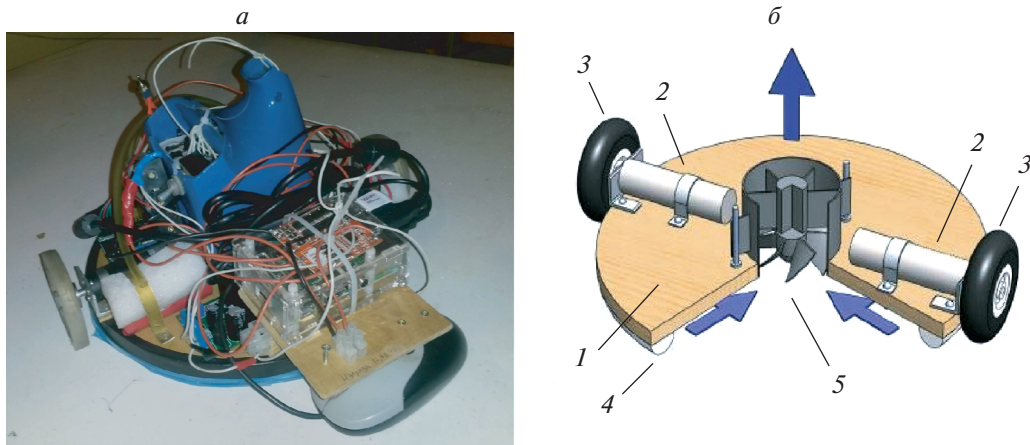


Рис. 1. Робот с аэродинамическим прижатием (а), состав системы управления робота (б)

димого в действие двигателем постоянного тока (направление движения воздуха показано стрелками). Питание двигателей осуществляется литий-ионными аккумуляторами, расположенными на борту робота, питание электронных бортовых приборов производится отдельным аккумулятором для предотвращения скачков напряжения, обусловленных силовой частью электрической схемы. Робот оборудован дифференциальным датчиком давления для определения величины давления в камере разрежения, оптическим датчиком положения для отслеживания перемещения робота, датчиком ускорения, устанавливающим величины ускорений по трем взаимно перпендикулярным направлениям, датчиком угловой скорости. Для повышения грузоподъемности возможно использование более мощного вакуумного насоса, а для повышения времени автономной работы – увеличение емкости аккумуляторных батарей. Возможные области применения такого робота – инспекция или очистка плоских поверхностей зданий и сооружений, мониторинг окружающего пространства. Для этих целей на борту робота может размещаться дополнительное навесное оборудование.

2. Система управления. Управление является адаптивным и разделено на управление нижнего уровня, осуществляемое микроконтроллером, и верхнего уровня, реализуемое одноплатным компьютером. Алгоритмы управления показаны на рис. 2. Одноплатный компьютер оснащен беспроводным приемопередающим устройством, которое позволяет получать данные и осуществлять (при необходимости) управление с внешнего компьютера. На нижнем уровне регулируется давление внутри камеры разрежения таким образом, чтобы это давление было минимальным и в то же время обеспечивающим прижимающее усилие для гарантирования равновесия робота. В программе микроконтроллера заложен алгоритм управления двигателем центробежного насоса с обратной связью по датчику давления и акселерометру. Также микроконтроллер осуществляет подачу нужных управляющих импульсов на приводные двигатели колес в соответствии с командами верхнего уровня управления и передает на верхний уровень показания гироскопа, датчика давления и акселерометра. Целевое положение робота задается с внешнего компьютера по беспроводной связи (возможно задание конкретной траектории движения). На верхнем уровне управления, реализованном на одноплатном компьютере, осуществляется алгоритм навигации робота. Оптический датчик положения подключен непосредственно к одноплатному компьютеру. При получении целеуказания от оператора подаются команды приводным двигателям колес и отслеживается их выполнение по датчику положения. Данные о положении, командах, режиме работы центробежного насоса и командах, поданных на двигатели колес, записываются в буфер системы управления нижнего уровня. Буферизация производится на случай возникновения непредвиденной аварийной ситуации, когда давление в камере разрежения падает ниже критического значения. Аварийная ситуация может возникнуть при увеличении зазора между корпусом и поверхностью перемещения. Например, это может произойти в случае наезда на препятствие или при выезде робота за границу опорной поверхности. В этом случае команды, поданные на двигатели колес и записанные в буфер, выполняются в обратном порядке для того, чтобы робот занял положение, в котором он был до возникновения аварийной ситуации, центробежный насос включается на полную мощность. На верхний уровень передается сигнал о возникновении аварийной ситуации, данные о положении и командах из буфера и

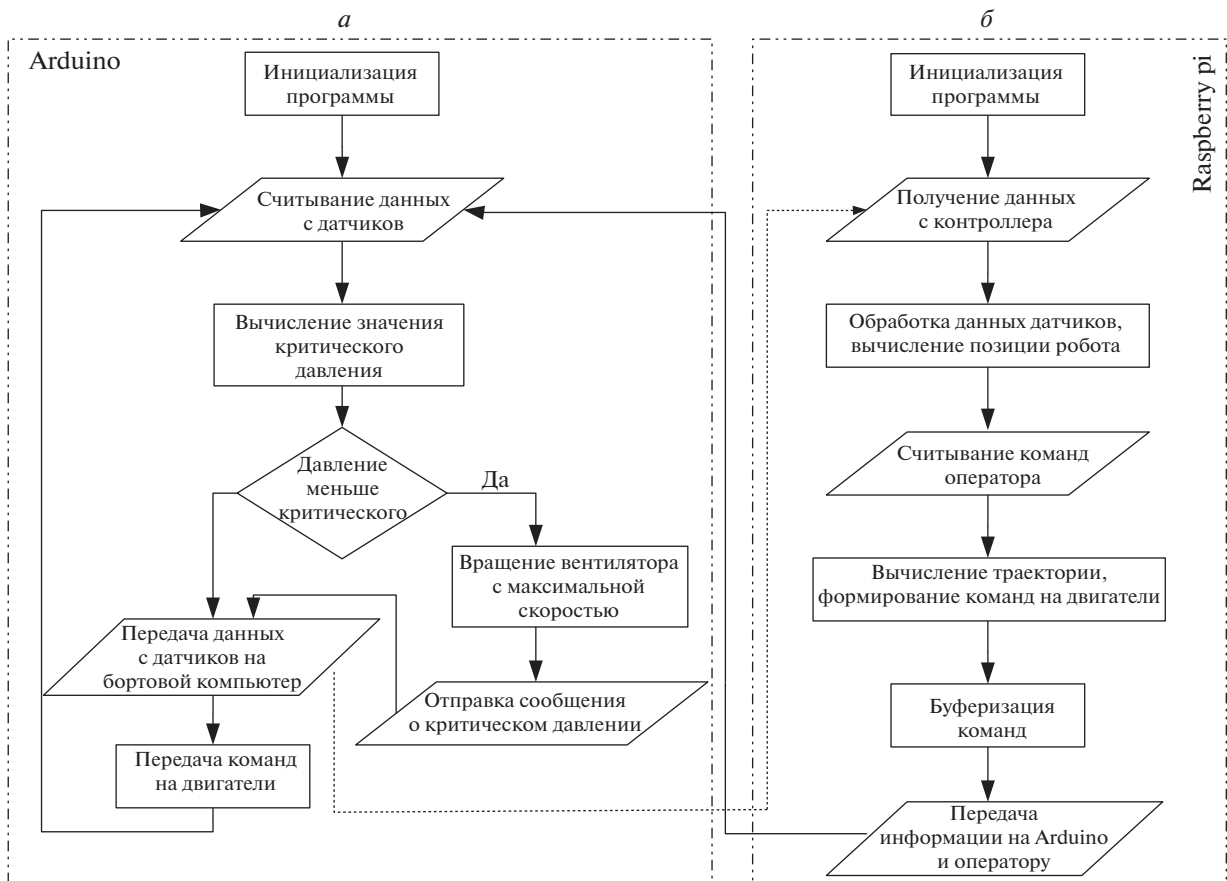


Рис. 2. Алгоритм работы бортового компьютера (а), алгоритм работы микроконтроллера (б)

текущие данные о положении. После выдачи сигнала аварийной ситуации ожидаются команды от оператора. При достижении роботом целевого положения посылается сигнал на внешний компьютер и ожидаются дальнейшие указания.

3. Система навигации. 3.1. Визуальная одометрия. Одной из ключевых задач мобильной робототехники является задача счисления пути. Для колесных роботов стандартное решение – установка датчиков угла поворота (энкодеров) на валы двигателей. Такое решение надежно и просто в реализации, но требует движения каждого колеса без проскальзывания. Не выполнение этого требования приводит к существенным ошибкам в оценке положения робота. Явление проскальзывания часто наблюдается у роботов вертикального перемещения, например, проскальзывание может произойти при уменьшении разницы давления внутри камеры разрежения и давления окружающей среды. Другой подход к решению задачи счисления пути, допускающий проскальзывания, – визуальная одометрия (оценка положения из последовательности изображений, снятых на камере). Детальный обзор методов визуальной одометрии приведен в [8]. Компьютерная оптическая мышь представляет собой недорогое, готовое решение данной задачи в случае движений вдоль плоскости [9–11]. В настоящей работе предполагается использовать компьютерную оптическую мышь в качестве оптического датчика движения для робота вертикального перемещения. Ориентация определяется по датчику угловых скоростей (гироскопу).

3.2. Математическая модель. Для определения позиции робота задается соответствие между глобальной системой координат и локальной системой координат робота. Пусть глобальная система координат задана векторами $\overline{O_1X_1}, \overline{O_1Y_1}$. В точке O находится центр робота, тогда определим локальную систему координат робота векторами $\overline{OX_R}, \overline{OY_R}$ (рис. 3). Обозначим угол поворота локальной системы координат робота относительно глобальной через θ , а через θ^i – информацию об углах поворота, полученную из данных датчика угловых скоростей путем интегрирования в моменты $i = 0, 1, \dots$ (каждое значение i соответствует моменту времени, в который происходит считывание данных с датчиков робота).

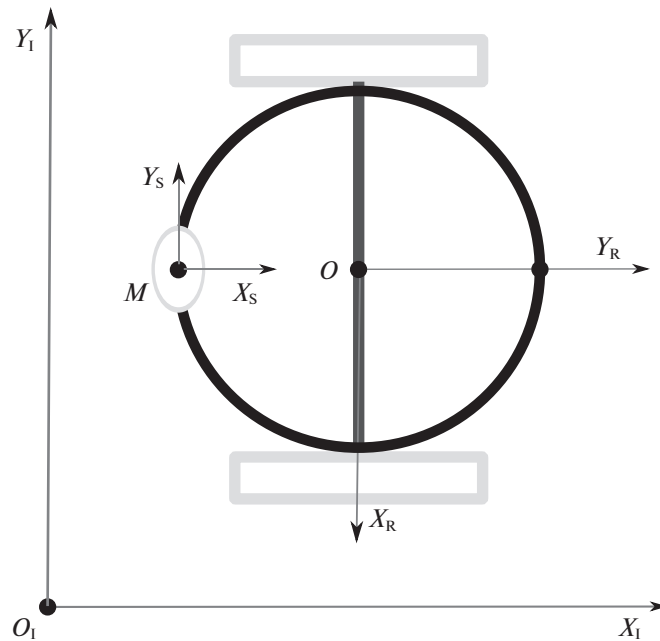


Рис. 3. Системы координат

Матрица преобразования из глобальной системы координат в локальную в момент i :

$$R_R^i \begin{pmatrix} \cos \theta^i & \sin \theta^i & 0 \\ -\sin \theta^i & \cos \theta^i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Информация о перемещении робота получается с оптического датчика, размещенного в точке M . Зададим связанную с ним систему координат с началом в M , а оси определим базисом $\{X_S, Y_S\}$ (рис. 3). Угол поворота этой системы координат относительно системы координат робота фиксирован и равен $\pi/2$. Тогда матрица поворота из системы координат робота в систему координат датчика:

$$R_S \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Пусть $\bar{\xi}_S^i$ – вектор перемещения оптического датчика относительно его положения в момент $i-1$ в локальной системе координат робота. Тогда вектор перемещения оптического датчика в глобальной системе координат

$$\bar{\xi}_I^i = (R_S R_R^i)^{-1} \bar{\xi}_S^i. \quad (3.3)$$

Позицию робота будем определять через значение вектора $\bar{r}_{O_I O}^i$. Если считать, что робот начинал движение из начала координат, то на основе данных о перемещениях датчика можно вычислить позицию робота:

$$\bar{r}_{O_I O}^i = \bar{r}_{O_I M}^i - \bar{r}_{O M}^i = \sum_{j=0}^i \bar{\xi}_I^j - \bar{r}_{O M}^i. \quad (3.4)$$

3.3. Реализация аппаратного и программного обеспечения системы управления. Нижний уровень системы управления реализован на базе микроконтроллера ARDUINO, верхний уровень – на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 2. Обмен информацией между одноплатным компьютером и микроконтроллером осуществляется через интерфейс UART. В качестве операционной системы одноплатного компьютера используется Ubuntu 14.04. Для упрощения разработки робота на верхнем уровне системы управления установлено промежуточное программное обеспечение ROS (Robot operating system), предоставляющее библиотеки и утилиты для разработки программного обеспечения роботов. ROS дополняет основную операционную систему аппаратной абстракцией, набором драйверов, библиотек, методами передачи сообщений между вычислительными процессами, средствами визуализации данных, менеджером ROS пакетов и мн. др. Программы, созданные в ROS, называются узлами (nodes). В разработанной системе управления были реализованы следующие узлы:

программа приема и передачи информации с микроконтроллера нижнего уровня системы управления на одноплатный компьютер верхнего уровня управления;

программа приема и передачи информации с одноплатного компьютера на внешний компьютер оператора по беспроводному каналу;

программа обработки данных, полученных с оптического датчика;

программа вычисления позиции робота; программа формирования команд управления двигателями.

Для расчета текущей позиции робота необходима информация об угле θ , вычисляемая по данным датчика угловых скоростей путем интегрирования и о перемещении $d\bar{\xi}_S$, которая вычисляется по данным оптического датчика (датчик реализован на базе компьютерной мыши Genius NetScroll 110). Эта информация средствами ROS передается в узел для вычисления позиции робота, где выполняются расчеты по формуле (3.4).

4. Оптимизация энергопотребления. Для увеличения времени автономной работы на нижнем уровне системы управления реализован алгоритм, контролирующий скорость вращения центробежного насоса, являющегося основным потребителем энергии. Для фиксации робота на горизонтальной поверхности аэродинамическое прижатие не требуется, поэтому центробежный насос отключается. Для фиксации робота на наклонной поверхности необходимо найти условия равновесия, которые определяют выражения для минимальной разницы между давлением внутри камеры разрежения и давлением окружающей среды. Это выражение существенно зависит от ориентации поверхности. Тогда можно управлять скоростью вращения центробежного насоса в зависимости от текущей разницы давлений для поддержания устойчивой фиксации. В реальной системе минимальная разница давлений выбирается с некоторым запасом, определяемым экспериментально. При разнице давлений ниже вычисленного значения наступает аварийная ситуация и насос включается на полную мощность. Перемещение робот осуществляет с малыми скоростями, поэтому его движение будем считать квазистатическим. Далее приведен вывод условий равновесия робота на наклонной поверхности.

Введем правую декартову систему координат $Oxuz$, связанную с роботом (рис. 4). Плоскость Oxu совпадает с плоскостью, по которой движется робот, робот находится в области $z \geq 0$, ось Ou направлена в сторону передней опоры робота, ось Ox – в сторону правого колеса. Робот имеет четыре точки контакта: K_1, K_2, K_3, K_4 , которые лежат в вершинах ромба. Начало системы координат O находится в центре ромба. На робот действуют внешние активные силы: сила тяжести $\bar{G} = (mg_x, mg_y, mg_z)^T$ (m – масса робота, а g_x, g_y, g_z – проекции вектора ускорения свободного падения на оси Ox, Oy, Oz) и сила прижатия к поверхности $\bar{F}_p = (0, 0, F_p)^T$, приложенные в точках G с радиус-вектором $\bar{r}_g = (0, 0, z_g)^T$ и P с радиус-вектором $\bar{r}_p = (0, 0, z_p)^T$ соответственно. Помимо активных сил на робот действуют силы реакции опоры. Робот всегда опирается на колеса в точках K_1 и K_2 . Колеса снабжены упругими шинами, которые сжимаются в области точки опоры при работе вакуумного насоса. Корпус робота выполняет роль двуплечного рычага, ось которого совпадает с осями вращения колес. С поверхностью при этом в каждый момент времени контактирует только одна из скользящих опор, соответствующих точкам K_3 и K_4 на рис. 4. Таким образом

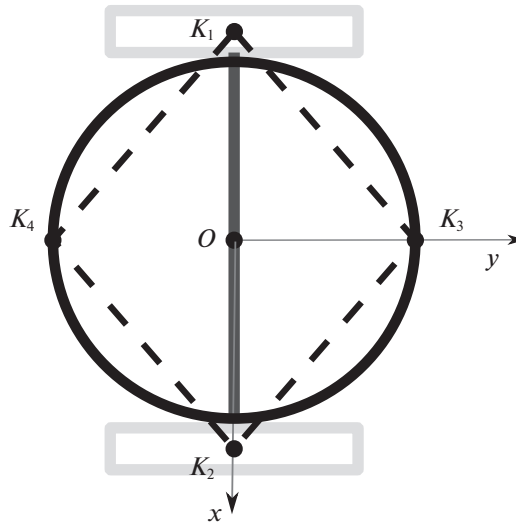


Рис. 4. Точки приложения сил

робот всегда опирается только на три точки опоры. Точками опоры будут K_1 , K_2 и K_3 , если $g_y \geq 0$, и точки K_1 , K_2 и K_4 , если $g_y < 0$. Введем следующие обозначения:

$$x_1 = -L, \quad x_2 = L, \quad x_3 = y_1 = y_2 = 0, \quad y_3 \begin{cases} l & \text{при } g_y \geq 0, \\ -l & \text{при } g_y < 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

При этих обозначениях выполняется условие

$$g_y y_3 \geq 0. \quad (4.2)$$

Введем следующие обозначения: главный вектор активных сил $\bar{R} = (R_x, R_y, R_z)^T$; главный момент относительно точки O $\bar{M} = (M_x, M_y, M_z)^T$, реакции опоры в точках контакта K_i – \bar{F}_i , проекции реакций на оси Ox , Oy и Oz – X_i , Y_i и N_i соответственно. Нормальные реакции неотрицательны, а касательные подчиняются закону Кулона, т.е. выполняются следующие соотношения:

$$N_i \geq 0, \quad \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \leq \mu N_i, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (4.3)$$

где μ – коэффициент сухого трения.

Таким образом, главный вектор и главный момент активных сил

$$\bar{R} = \bar{G} + \bar{F}_p = \begin{pmatrix} mg_x \\ mg_y \\ F_p + mg_z \end{pmatrix}, \quad \bar{M} = \bar{r}_g \times \bar{G} + \bar{r}_p \times \bar{F}_p = \begin{pmatrix} -z_g mg_y \\ z_g mg_x \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Условия равновесия тела имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} R_z + \sum_{i=1}^3 N_i = 0, \\ M_x + \sum_{i=1}^3 y_i N_i = 0, \\ M_y - \sum_{i=1}^3 x_i N_i = 0, \\ R_x + \sum_{i=1}^3 X_i = 0, \\ R_y + \sum_{i=1}^3 Y_i = 0, \\ M_z + \sum_{i=1}^3 (x_i Y_i - y_i X_i) = 0. \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Из первого уравнения (4.3) и (4.5) следует, что $R_z \leq 0$, что соответствует условию $F_p \leq -mg_z$. Случай $R_z = 0$ возможен только при $\bar{R} = 0$, $\bar{M} = 0$, в дальнейшем этот вариант рассматривать не будем.

С учетом (4.1)–(4.3) представим условия равновесия (4.5) в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = -\frac{1}{2}R_z - \frac{z_g}{2l}|R_y| + \frac{z_g}{2L}R_x \geq 0, \\ N_2 = -\frac{1}{2}R_z - \frac{z_g}{2l}|R_y| - \frac{z_g}{2L}R_x \geq 0, \\ N_3 = -\frac{z_g}{l}|R_y| \geq 0, \\ Y_1 = Y_2 = -\frac{1}{2}R_y, \\ X_1 + X_2 = -R_x, \\ \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \leq \mu N_1, \\ \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \leq \mu N_2. \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Условия равновесия выполнены, если для N_1 , N_2 , N_3 , Y_1 , Y_2 , выражаемых первыми четырьмя равенствами (4.6), существуют X_1 , X_2 , удовлетворяющие трем последним соотношениям (4.6). Найдем достаточные условия равновесия, положив $X_1 = -R_x/2$, $X_2 = -R_x/2$. Тогда последние два соотношения (4.6) выполняются, если

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 \geq \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{2\mu}, \\ N_2 \geq \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{2\mu}. \end{array} \right.$$

Подставив в эти неравенства выражения для N_1 и N_2 из (4.6), получим условия равновесия в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{2}R_z - \frac{z_g}{2l}|R_y| + \frac{z_g}{2L}R_x \geq \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{2\mu}, \\ -\frac{1}{2}R_z - \frac{z_g}{2l}|R_y| - \frac{z_g}{2L}R_x \geq \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{2\mu}. \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Устройство прижатия имеет форму окружности радиуса r , в вакуумируемой полости создается разрежение, характеризуемое разностью δp между атмосферным давлением и давлением внутри полости. Таким образом, прижимающее усилие $F_p = -\pi r^2 \delta p$. Используя (4.4) и (4.7), получаем условия равновесия (4.6):

$$\delta p \geq \frac{m}{\pi r^2} \left(g_z + \frac{z_g}{L}|g_x| + \frac{z_g}{l}|g_y| + \frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{2\mu} \right). \quad (4.8)$$

Значение δp определяется показаниями датчика, измеряющего давление в камере разрежения, значения g_x , g_y , g_z — показаниями акселерометра. Остальные величины являются постоянными.

Для проверки зависимости (4.8) проведен эксперимент, в котором измерялось минимальное давление в камере разрежения, необходимое для устойчивой фиксации робота на наклонной поверхности. В эксперименте измерялся угол наклона поверхности α . Робот ориентировался так,

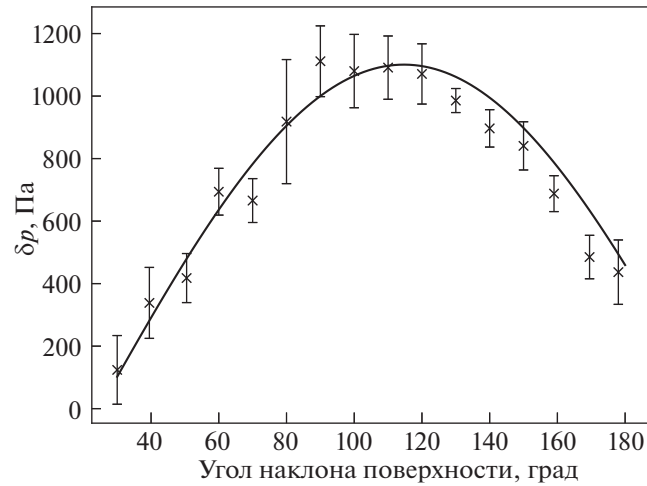


Рис. 5. Зависимость минимального давления в камере разрежения от ориентации поверхности: модельные значения (сплошная линия), экспериментальные значения (символы ×)

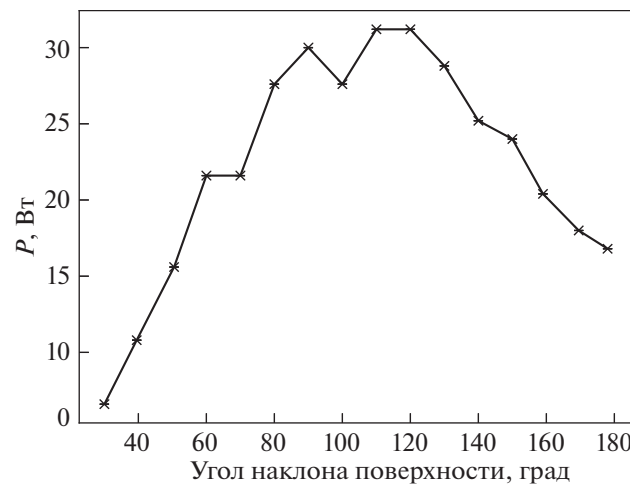


Рис. 6. Зависимость потребляемой электрической мощности от ориентации поверхности: экспериментальные значения (символы ×)

чтобы ось Oy робота была параллельна оси наклона поверхности в направлении подъема ($g_x = 0$, $g_y = -g \sin \alpha$, $g_z = -g \cos \alpha$). Для такой конфигурации системы из (4.8)

$$\delta p_{\min} = \frac{m}{\pi r^2} \left(-g \cos \alpha + \frac{z_g}{l} |g \sin(\alpha)| + \frac{|g \sin \alpha|}{\mu} \right). \quad (4.9)$$

В эксперименте измерялись давление в камере разрежения и потребляемая роботом электрическая мощность, зависящие от наклона поверхности. Использовался робот со следующими параметрами: $l = 0.125$ м, $L = 0.135$ м, $z_g = 0.01$ м, $m = 2.3$ кг, $r = 0.125$ м, $\mu = 0.48$. На рис. 5 сравнены теоретические значения, вычисленные по формуле (4.9), с экспериментальными. Расхождение экспериментальных данных с теоретическими составляет не более 200 Па. Наибольшее разрежение требуется при угле наклона поверхности близком к 120° .

На рис. 6 изображен график зависимости мгновенной электрической мощности, подаваемой на робот, от угла наклона поверхности. При угле наклона в 120° мощность составляет $P_{120} = 31.17$ Вт, а при угле наклона в 50° равна $P_{50} = 15.50$ Вт, т.е. при изменении наклона поверхности со 120 до 50° возможно снизить энергозатраты на 51%.

Заключение. Разработана система управления адаптивного робота вертикального перемещения, обеспечивающая достижение точки на плоскости с заданными координатами. Определены условия равновесия робота на поверхности, произвольно ориентированной в пространстве. Получена зависимость минимального давления в камере разрежения от ориентации робота в пространстве, позволяющая существенно уменьшить расход электроэнергии, потребляемой насосом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Longo D., Muscato G.* The Alicia 3 Climbing Robot: a Three-Module Robot for Automatic Wall Inspection // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. V. 13. P. 42–50.
2. *Xu D., Gao X., Wu X., Gan N., Li K., Kikuchi K.* Suction Ability Analyses of a Novel Wall Climbing Robot // Proc. 2006. IEEE Intern. Conf. on robotics and Biomimetics. Kunming, China. 2006. P. 1506–1511.
3. *Yamaguchi T., Amakawa T., Wu T., Fan N., Li K., Kikuchi K.* Development of Negative Pressure Suction Mechanism in Omnidirectional Wall-climbing Robot for Inspection of Airplanes // Advances in Cooperative robotics. Proc. 19th Intern. Conf. on CLAWAR 2016. London, GB, 2016. P. 106–114.
4. *Yue R., Xiao J., Wang S., Joseph S.L.* Modeling and Path Planning of the City-climber Robot Part I: Dynamic Modeling // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Biomimetics. Guilin, China, 2009. P. 2385–2390.
5. *Xiao J., Li B.* Rise-rover: a Wall-climbing robot with High Reliability and Load-Carrying Capacity // Assistive Robotics. Proc. 18th Intern. Conf. on CLAWAR 2015. Zhejiang, China, 2015. P. 299–306.
6. *Gradetsky V.G., Chashchukhin V.G.* Mechanics of Crawling Robot with Sliding Seal // Proc. 15th Intern. Conf. on CLAWAR 2012. Baltimore, USA, 2012. P. 577–584.
7. *Gradetsky V., Knyazkov M., Fomin L., Chashchukhin V.* Miniature Robot Mechanics. M.: Nauka, 2010.
8. *Scaramuzza D., Fraundorfer F.* Visual Odometry [Tutorial] // IEEE Robotics Automation Magazine. 2011. V. 18. P. 80–92.
9. *Ng T.* The Optical Mouse as a Two-dimensional Displacement Sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. V. 107. P. 21–25.
10. *Lee S.* Mobile Robot Localization Using Optical Mice // IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics. 2004. V. 2. P. 1192–1197.
11. *Minoni U., Signorini A.* Low-cost Optical Motion Sensors: an Experimental Characterization // Sensors and Actuators A: Physical. 2006. V. 128. P. 402–408.