

**В. В. Серебряный**, канд. техн. наук, доц., vsereb@bmstu.ru,  
**А. А. Бошляков**, канд. техн. наук, доц., boshlyakov@bmstu.ru,  
**С. В. Калинин**, канд. техн. наук, доц., kalinichenkov@bmstu.ru,  
**А. И. Огородник**, ст. преподаватель, alexander.ogorodnik@bmstu.ru,  
**К. В. Коновалов**, ассистент преподавателя, bmstu.konovlov2011@yandex.ru,  
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)

## Шагающий робот для перемещения по вертикальным и произвольно ориентированным в пространстве поверхностям

*Рассматриваются вопросы проектирования шагающего робота с захватными устройствами (ЗУ), позволяющими роботу передвигаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Подобные роботы актуальны прежде всего для осмотра и диагностики состояния различных промышленных конструкций. В рамках данной работы предложена модель двухопорного робота с захватными устройствами на опорах, позволяющими крепиться к опорным поверхностям с небольшой кривизной, произвольно ориентированным в пространстве. Для обеспечения крепления к подобным опорным поверхностям робот спроектирован с пятью степенями свободы. Важным критерием является возможность ловкого передвижения по поверхностям. Кроме того, одна из степеней свободы робота была сделана линейной, что облегчает переступание через преграды и позволяет реализовывать более простые алгоритмы шагания.*

*При креплении робота сразу двумя ЗУ за опорные поверхности кинематическая цепь замыкается, и без дополнительных мер это может приводить к возникновению нежелательных сил и моментов в звеньях робота. В данной работе предлагается использовать два метода совместно — реализовать импедансное управление за счет введения обратной связи по оценке момента на основе измерения токов двигателя и обеспечить податливость ЗУ за счет собственной упругости. Проведено математическое моделирование робота с учетом кинематики конструкции и детальных моделей исполнительных двигателей и усилителя мощности на полевых транзисторах, показавшее возможность снижения нежелательных усилий в звеньях робота, возникающих в процессе крепления робота за две опорные поверхности одновременно. Наилучшие результаты были достигнуты при управлении вектором тока синхронного двигателя и использовании сигналов тока для реализации импедансного управления.*

*Также приведены упрощенная схема привода, реализующая векторное управление током исполнительного двигателя, и структурная схема системы управления, позволяющей реализовать различные походки в полуавтоматическом режиме и в режиме управления от оператора.*

**Ключевые слова:** шагающий робот вертикального перемещения, система управления, моделирование движения, позиционно-силовое управление

### Введение

Появление мобильных роботов вертикально-го перемещения (РВП) обусловлено необходимостью автоматизации различных технологических операций, для выполнения которых необходимо совершать движение или находиться в режиме прикрепления к наклонным и вертикальным поверхностям. Такие роботы со специальным оборудованием на борту могут найти применение в различных сферах, таких как энергетика, химическая и нефтегазовая промышленность, строительство и обслуживание зданий, судостроение, а также при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций [1, 2].

К настоящему времени в мире создано большое число прототипов таких роботов, в конструкции которых используются все основные типы движителей (колесный, гусеничный шагающий) и способы удержания (магнитный,

вакуумный, воздушный винт, механические захваты, адгезионные материалы) [3–5].

В России в течение многих лет работы по созданию таких роботов ведутся в Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН [6], а также в ряде других организаций [7, 8].

Примерно 20 лет назад сформировалось новое направление в развитии РВП — это создание наиболее сложных с точки зрения как механики, так и управления роботов, предназначенных для движения по сложно-ориентированным в пространстве поверхностям, способных перемещаться по горизонтальным, вертикальным, наклонным, потолочным поверхностям и в процессе движения осуществлять переход с одной поверхности на другую [9].

Анализ конструктивных схем показал, что подобный робот должен иметь как минимум две группы захватных устройств (ЗУ): с помощью одной группы ЗУ он удерживается на

поверхности, другая группа ЗУ в то же время перемещается и стыкуется с другой поверхностью, расположенной под произвольным углом по отношению к первой [9, 10].

Здесь следует сделать замечание, что для случаев перехода с горизонтальной на вертикальную поверхность существуют технические решения, в которых используется один механизм удержания [11].

Большинство известных прототипов роботов имеют механическую систему, состоящую либо из двух платформ, соединенных шарниром, либо имеющую две и более опор с ЗУ [9].

Общей проблемой подобных роботов является необходимость параллельной ориентации одной из опор относительно плоскости при движении в режиме "переход с одной поверхности на другую". Использование только шарниров вращения в указанных конструкциях требует обеспечения их согласованной работы при выполнении каждого шага, что вызывает необходимость применения сложной системы управления с развитой сенсорной подсистемой [12]. Кроме того, возможность возникновения нежелательных усилий и моментов при одновременном зацеплении двумя или более ЗУ за опорную поверхность требует введения податливости в приводы [13–15]. Данная задача может быть решена в том числе с помощью оценки сил и моментов в звеньях манипулятора по токам исполнительных двигателей [16].

### Конструктивная схема шагающего робота с пятью степенями подвижности

В конструкции шагающего робота, разработанного на кафедре "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана, предложено использовать четыре шарнира вращения и один шарнир линейного перемещения, что позволяет упростить алгоритмы перемещения в режиме "движение по плоскости", в том числе по плоскостям, имеющим разную пространственную ориентацию, и "переход с одной поверхности на другую". В последнем случае упрощается реализация поступательного перемещения опоры, что позволяет создавать достаточное усилие прижима к поверхности в случае использования вакуумных захватных устройств [17]. Механическая система робота (рис. 1) включает в себя центральное звено *I* с телескопическим механизмом поступательно-

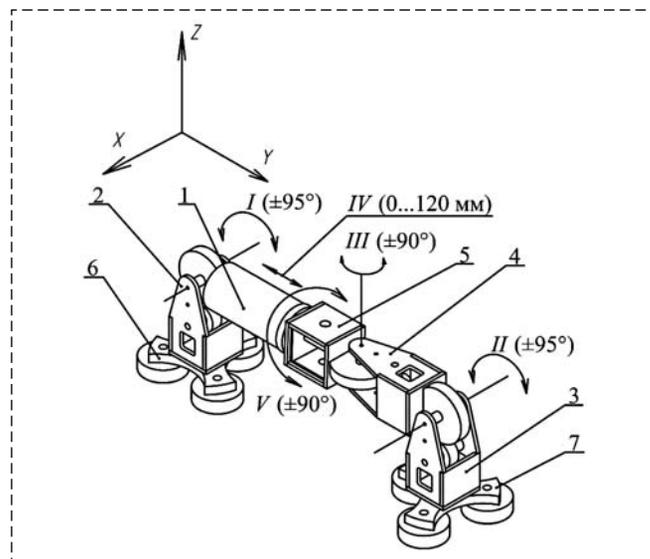


Рис. 1. Конструктивная схема шагающего робота с пятью степенями подвижности

Fig. 1. A design diagram of a walking robot with five degrees of freedom

го перемещения вдоль оси *Y* (стрелка *IV*), боковые звенья 2 и 3 с установленными на их торцах опорами 6 и 7 соответственно с захватными устройствами. С одной стороны центральное звено *I* связано с боковым звеном 2 через шарнир вращения вокруг оси *X* (стрелка *I*), с другой стороны к центральному звену крепится шарнир вращения 5 вокруг оси *Y* (стрелка *V*). Шарнир 5 связан шарниром вращения вокруг оси *Z* (стрелка *III*) со звеном 4, которое, в свою очередь, связано с боковым звеном 3 через шарнир вращения вокруг оси *X* (стрелка *II*). Применение узла поступательного перемещения позволяет менять расстояние между центрами опор 6 и 7. Для удержания на вертикальных поверхностях используются электромагниты.

Перемещение робота осуществляется следующим образом. Перед началом движения обе опоры 6 и 7 фиксируются на плоской поверхности (вертикальной, наклонной, горизонтальной). Затем одна из опор расфиксируется и перемещается. Реализованы два типа движений:

- приставными шагами, за счет работы шарниров вращения боковых звеньев 2 и 3 (стрелки *I* и *II*), а также механизма поступательного перемещения центрального звена *I* (стрелка *IV*), что показано на рис. 2, а;
- переворотом одной из опор на  $180^\circ$ , за счет работы или только шарниров вращения 2 и 3, или совместной с ними работы механизма поступательного перемещения звена *I* в целях изменения длины шага.

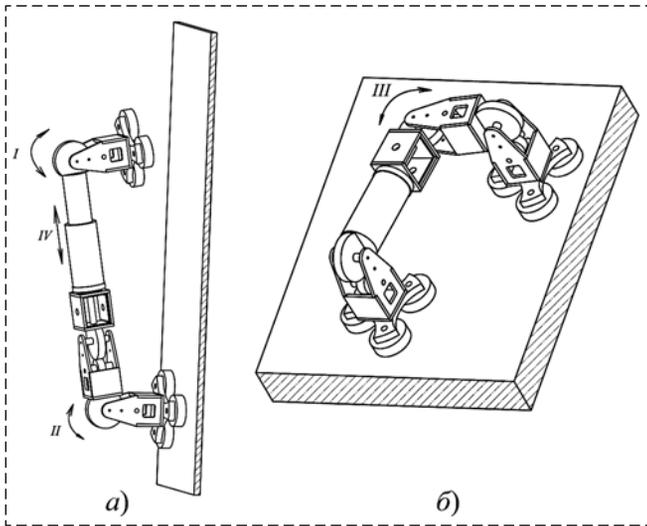


Рис. 2. Принцип движения приставным шагом с использованием вращения шарниров боковых звеньев (стрелки I и II) и возвратно-поступательного движения механизма линейного перемещения (стрелка IV) (а) и принцип изменения направления движения (стрелка III) (б)

Fig. 2. The principle of movement by an attached step using the rotation of the hinges of the side links (arrows I and II) and the reciprocating movement of the linear movement mechanism (arrow IV) (a) and direction movement change principle (arrow III) (b)

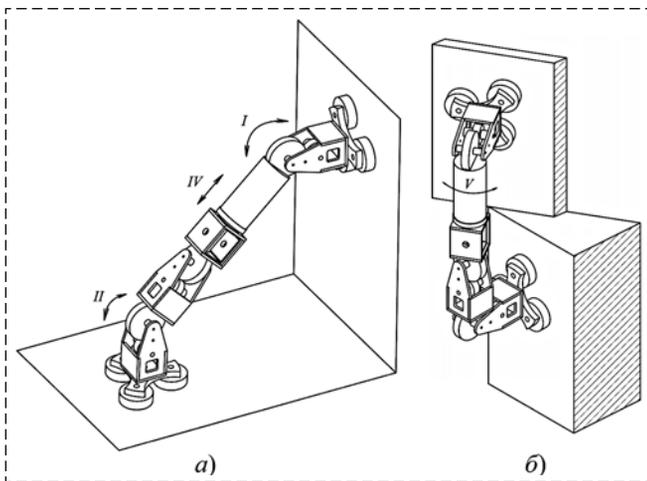


Рис. 3. Принцип перехода с одной поверхности на другую (стадия 1) (а) и принцип движения механизма по плоскостям, расположенным под некоторым углом друг к другу (б)

Fig. 3. The principle of relocation from one surface to another (stage 1) (a) and the principle of movement of the mechanism along planes located at an angle to each other (b)

Изменение направления движения осуществляется с помощью шарнира вращения звена 4 (стрелка III), при фиксации на поверхности одной из опор и положении "над поверхностью" другой, что показано на рис. 2, б.

При переходе с поверхности на поверхность, например с горизонтальной на вертикальную, что показано на рис. 3, а, за счет вращения шарниров звеньев 2 и 3 (стрелки I и II) происходит фиксация одной из опор на вертикальной

поверхности (стадия 1). Затем также за счет вращения шарниров 2 и 3 (стрелки I и II) на вертикальной поверхности фиксируется вторая опора (стадия 2). С помощью механизма поступательного перемещения звена I (стрелка IV) возможно изменять положение опоры на поверхности и обеспечивать ее плоскопараллельное движение.

Обеспечение движения механизма по плоскостям, расположенным под некоторым углом друг к другу, осуществляется за счет вращения шарнира 5 (стрелка V), что показано на рис. 3, б.

### Аппаратная реализация системы управления робота

Структурная схема аппаратной части системы управления робота изображена на рис. 4 и содержит следующие основные части:

- пульт управления на базе персонального компьютера, обеспечивающий управление роботом и отображение видео- и телеметрической информации;
- блок управления (отнесенный), обеспечивающий питание робота и каналы связи робота с пультом управления;
- бортовую аппаратную часть системы управления, размещенную на борту робота.

Управление и питание робота осуществляется по проводам. Питание робота обеспечивается напряжением 24 В от импульсного источника питания, с последующим вторичным преобразованием к необходимым уровням напряжений. Управление осуществляется по интерфейсу RS-232. Передача видеосигнала с камер наблюдения робота на монитор пульта управления, а также телеметрическая информация передаются по беспроводным каналам данных за счет Wi-Fi Роутера и Wi-Fi приемопередатчиков.

Пульт управления разработан на основе персонального компьютера. Программная часть пульта управления состоит из специального программного обеспечения, обеспечивающего управление роботом, а также программного обеспечения, обеспечивающего отображение телеметрической и видеoinформации для оператора.

Блок управления включает в себя преобразователь питания, преобразователь интерфейса и приемопередатчик беспроводного канала данных, установленные в единый корпус.

Wi-Fi роутер обеспечивает беспроводной канал связи пульта оператора с одноплатным

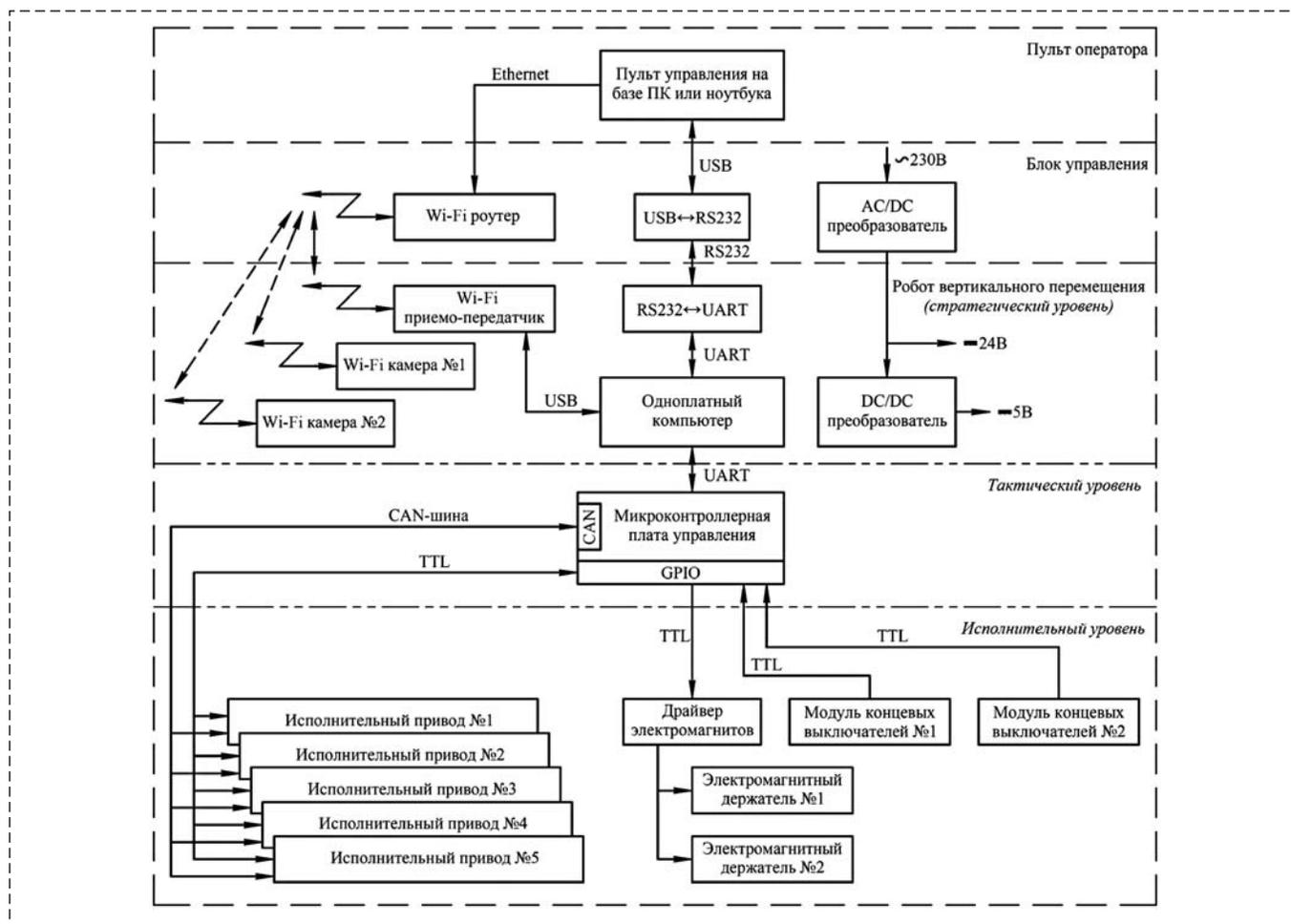


Рис. 4. Структурная схема аппаратной части системы управления шагающего робота с пятью степенями подвижности  
 Fig. 4. Diagram of the control system hardware part for a walking robot with five degrees of freedom

компьютером робота вертикального перемещения, служащий для передачи телеметрической информации. Также за счет Wi-Fi роутера обеспечивается передача видеоинформации с камер на пульт оператора. Беспроводной канал связи должен обеспечить оператору возможность управления роботом в ручном и полуавтоматическом режимах, а также предоставить оператору возможность контроля за роботом в автоматическом режиме управления.

Робот имеет многоуровневую систему управления, включающую в себя стратегический, тактический и исполнительный уровни.

### Стратегический уровень управления робота

Аппаратная часть стратегического уровня управления робота содержит:

- одноплатный компьютер с преобразователями интерфейсов передачи данных, служащий основой управления робота;

- беспроводные приемопередатчики, обеспечивающие передачу видеоинформации оператору.

Одноплатный компьютер является основой для реализации системы управления роботом. Встроенное программное обеспечение позволяет планировать движения, формировать команды для тактического уровня управления и осуществлять обмен данными с пультом оператора. Также на одноплатный компьютер ложится задача управления роботом в автоматическом режиме и передача телеметрической информации оператору на пульт управления в различных режимах управления.

### Тактический уровень управления робота

Тактический уровень управления реализуется на базе микроконтроллерной платы с DSP-микроконтроллером. На этом уровне в режиме реального времени осуществляется

согласованное управление устройствами исполнительного уровня.

На тактическом уровне выполняется преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня управления, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев механического устройства с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь, ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы). Также в задачу тактического уровня входит реакция на внешние воздействия и контактные взаимодействия, фиксируемые в том числе за счет концевых выключателей. С использованием концевых выключателей обеспечивается контроль за правильным ориентированием ЗУ шагающего робота относительно опорной поверхности, а также управление этими ЗУ для надежной фиксации робота в различных положениях.

### Исполнительный уровень управления робота

Исполнительный уровень управления робота включает в себя следующие основные элементы:

- исполнительные приводы, осуществляющие управление звеньями робота;
- захватные устройства;
- концевые выключатели.

Структурная схема исполнительного привода изображена на рис. 5. Исполнительные приводы содержат следующие основные элементы:

- драйвер исполнительного двигателя (ИД);
- исполнительный двигатель (СДПМ) со встроенными датчиками холла (ДХ);
- инкрементный датчик положения/скорости (ДС) ротора;
- редуктор (Р);
- абсолютный датчик положения (ДП).

Драйвер привода представляет собой плату, содержащую микропроцессор и необходимые интерфейсы для взаимодействия с тактическим уровнем, обработки информации с датчиков и управления бесколлекторным двигателем.

Задающее воздействие и другие сигналы управления передаются на драйвер с тактического уровня микропроцессорной платой управления по интерфейсу CAN. Драйвер выполняет управление двигателем согласно управляющим командам в реальном времени с контролем параметров привода. В случае неисправности исполнительного привода с исполнительного уровня передается сигнал о неполадке с помощью выхода с открытым коллектором. Дополнительно с тактического уровня передается цифровой сигнал о срочной остановке привода. Исполнительный двигатель является бесколлекторным синхронным трехфазным микродвигателем, фазы которого первоначально коммутируются по датчику Холла в режиме шестишагового управления, по-

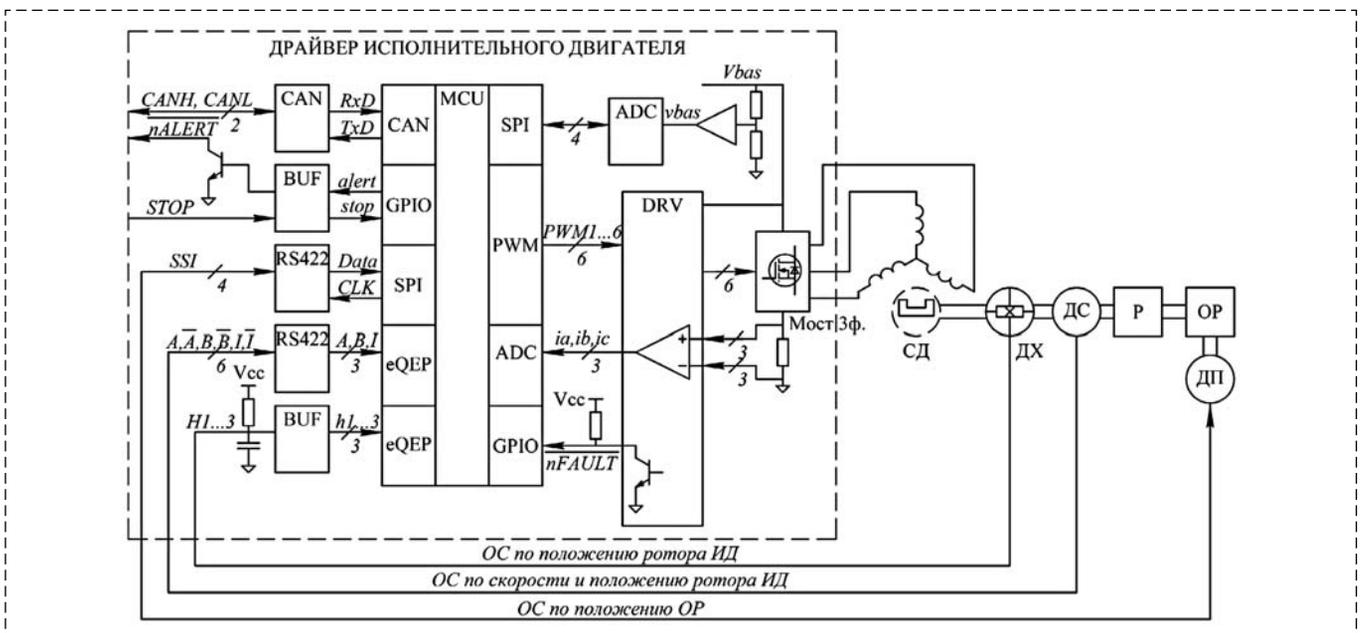


Рис. 5. Схема исполнительного привода звена робота

Fig. 5. Robot link drive scheme

сле пересечения референтной метки нулевого положения инкрементного датчика положение ротора отсчитывается с помощью квадратурного декодера eQEP, встроенного в микроконтроллер для осуществления работы в режиме вентильного двигателя. Инкрементальный датчик положения ротора служит как для реализации устойчивого управления без предельных циклов, вызванных люфтом редуктора, так и для получения сигнала скорости при реализации параллельной коррекции. Абсолютный датчик положения (ДП) служит для контроля реального положения объекта регулирования (ОР) — звена робота, также эти данные учитываются на верхних уровнях управления. Абсолютный датчик положения подключается по интерфейсу SSI, который реализуется с помощью настройки встроенного в микроконтроллер модуля SPI и драйвера с дифференциальными сигналами RS422. Для реализации ограничения выходного момента и токов фаз исполнительного привода используются данные измерения напряжения на токовых шунтах, стоящих в цепях истока нижних ключей трехфазного моста на полевых МОП транзисторах. Также данные измерения тока используются для формирования сигнала оценки момента двигателя и обеспечения податливости за счет введения дополнительной обратной связи (ОС) по моменту в регулятор положения. Для корректировки закона управления и диагностики силовых цепей проводится измерение напряжения питания с помощью внешнего АЦП.

### Моделирование движения робота

Для исследования движения робота была использована математическая модель, учитывающая электромеханические процессы в приводах звеньев. За основу математической модели привода была взята модель синхронного двигателя, описываемая следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U = \left( \mathbf{R} + \frac{d\mathbf{L}}{dt} \right) \mathbf{I} + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \frac{d\Psi}{dt}; \\ M = \mathbf{I}^T \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \mathbf{I}^T \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{I} + \frac{\partial w_c}{\partial \theta}; \\ J\varepsilon = M + M_{out}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \varepsilon; \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega, \end{cases}$$

где  $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$  — вектор напряжения на обмотках электродвигателя;  $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$  — вектор токов

в обмотках;  $\Psi$  — вектор потокосцепления магнитов с обмотками;  $\mathbf{R}$  — матрица сопротивления обмоток;  $\mathbf{L}$  — матрица индуктивностей и взаимноиндуктивностей обмоток;  $M$  — крутящий момент электродвигателя;  $M_{out}$  — внешний момент;  $\varepsilon$  — угловое ускорение;  $\Omega$  — угловая скорость;  $\theta$  — угловое положение ротора;  $w_c$  — зубцовый магнитный момент.

Для моделирования синхронных двигателей с постоянными магнитами были приняты следующие допущения: синусоидальность магнитодвижущей силы, постоянная индуктивность в зависимости от положения ротора, пренебрежимо малая взаимная индуктивность обмоток, бесконечно большое сопротивление между обмотками двигателя. С учетом данных допущений получена упрощенная система дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{L}^{-1} \left[ \mathbf{U} - \mathbf{R}\mathbf{I} - \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \Omega \right]; \\ M = \mathbf{I}^T \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + \frac{\partial w_c}{\partial \theta}; \\ J\varepsilon = M + M_{out}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \varepsilon; \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega, \end{cases}$$

где матрицы принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}^{-1} &= \begin{bmatrix} 1/L_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} R_0 & 0 & 0 \\ 0 & R_0 & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix}; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} &= -n\psi_m \begin{bmatrix} \sin(n\theta) \\ \sin(n\theta + 2\pi/3) \\ \sin(n\theta + 4\pi/3) \end{bmatrix}; \\ \frac{\partial w_c}{\partial \theta} &= -2nw_{cm} \sin(2n\theta) \end{aligned}$$

со следующими параметрами:  $\psi_m$  — амплитуда потокосцепления;  $w_{cm}$  — амплитуда зубцового момента;  $n$  — число пар полюсов синхронной машины.

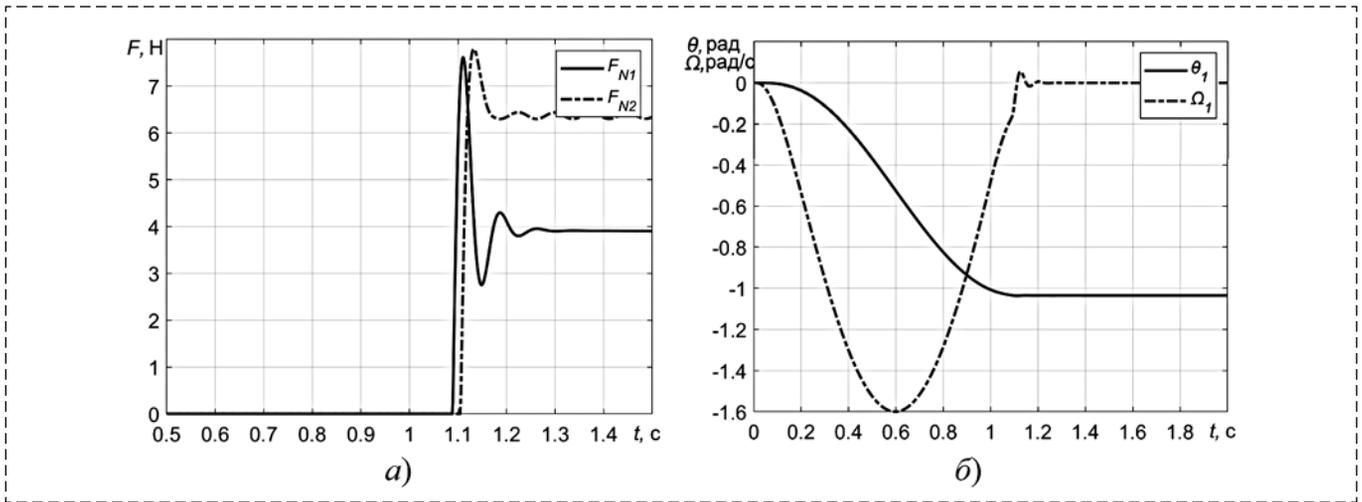


Рис. 6. Нормальная сила реакции опоры при подведении ЗУ к второй опорной поверхности (а) и угловое положение и скорость звена II (б)

Fig. 6. Normal reaction force of the support when bringing the gripper to the second support surface (a) and angular position with the speed of link II (b)

В модели оконечного усилителя мощности на полевых транзисторах использовались идеализированные модели транзисторов MOSFET, учитывающие сопротивление открытого и закрытого каналов, а также напряжение прямого смещения и эквивалентного сопротивления обратного диода.

Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами осуществлялось векторным методом. Проводился анализ различных вариантов управления как вектором токов, так и вектором напряжения синхронного двигателя. В контуре регулятора тока использовался ПИ регулятор после преобразования координат с помощью преобразований Кларка и Парка. Кроме того, для увеличения податливости системы управления в корректирующее устройство по положению вводился сигнал по току. Для расчетов применялась идеализированная математическая модель редуктора, учитывающая передаточное отношение, момент инерции, но предполагающая отсутствие люфта и абсолютную жесткость механической передачи.

Для исследования динамики робота полученная модель приводов была использована совместно с 3D-моделью робота в прикладном пакете Simcar Muttibody. Сравнение различных законов управления проводилось на основе анализа движения и процесса подведения захватного устройства к опорной поверхности с учетом контактных сил взаимодействия. На рис. 6, а изображены графики нормальной силы реакции опоры  $F_{N1}$  для импедансного управле-

ния с управлением вектором тока двигателя и  $F_{N2}$  для позиционного управления с управлением вектором напряжений двигателя при упоре ЗУ в опорную поверхность. По графикам можно определить, что нормальная сила реакции опоры при управлении вектором токов и позиционно-силовом управлении имеет меньшее значение в установившемся режиме, чем при управлении вектором напряжений.

Проведенное моделирование показало, что введение коррекции по току позволяет добиться большей податливости системы управления и избежать повышенных сил в кинематической замкнутой цепи, а также исключить колебательность переходных процессов при зацеплении обоими ЗУ за опорную поверхность. Кроме того, обеспечивается меньшее значение силы действующих токов в данном процессе. Графики силы токов для управления вектором токов изображены на рис. 7, а (см. вторую сторону обложки), а для векторов напряжений — на рис. 7, б.

### Заключение

В статье приведены результаты разработки двухопорного шагающего робота с пятью степенями подвижности для перемещения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. На основе проведенного моделирования показано, что предложенная конструкция, обеспечивающая ориентацию опор в трех плоскостях, позволяет реализовать различные походки и упрощает реализацию алго-

ритма перехода с одной поверхности на другую. Применение позиционно-силового управления в сочетании с управлением векторами тока синхронных исполнительных двигателей с постоянными магнитами обеспечивает уменьшение контактных сил взаимодействия с опорной поверхностью при шагании, контроль крутящих моментов в звеньях робота, а также уменьшение силы токов при замыкании кинематической цепи. Применение роботов с подобной кинематической схемой целесообразно прежде всего для задач инспекции и осмотра различных сооружений, а также корпусов транспортных систем со сложной геометрией наружных поверхностей.

#### Список литературы

1. **Dethe R. D., Jaju S. B.** Developments in wall climbing robots: a review // International journal of engineering research and general science. 2014. Vol. 2, N. 3. P. 33–42.
2. **Zhao Z., Shirkoohi G.** Climbing robot design for NDT inspection // Human-Centric Robotics: Proceedings of CLAWAR 2017: 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. 2018. P. 259–266.
3. **Kolhalkar N. R., Patil S. M.** Wall climbing robots: A review // International Journal of Engineering and Innovative Technology. 2012. Vol. 1, N. 5. P. 227–229.
4. **Das A., Patkar U. S., Jain S., Majumder S., Roy D. N., Char S. K.** Design principles of the locomotion mechanism of a wall climbing robot // Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics. 2015. P. 1–7.
5. **Сырых Н. В., Чашухин В. Г.** Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 163–173.
6. **Градецкий В. Г., Князьков М. М.** Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1. С. 9–16.
7. **Аверьянов Е. В., Коваленко Б. Б., Костин А. В., Пелепас Е. И., Подураев Ю. В., Яковлев С. Ф.** Основные аспекты создания отечественных технологических мобильных роботов вертикального перемещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 23–27.
8. **Товарнов М. С., Быков Н. В.** Математическая модель механизма перемещения мобильного гусеничного робота с магнитно-ленточным принципом вертикального перемещения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 74–84.
9. **Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калинин С. В., Кравчук Л. Н.** Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М: Наука, 2001. 359 с.
10. **Zhu H., Guan Y., Wu W., Zhou X., Zhang L., Zhang X., Zhang H.** The superior mobility and function of W-Climbot—A bio-inspired modular biped wall-climbing robot // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2011. P. 509–514.
11. **Серебряный В. В., Лапин Д. В., Мокаева А. А.** Экспериментальные исследования динамики мобильного робота с механизмом вертикального перемещения на магнитных гусеничных движителях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 68–75.
12. **Юревич Е. И.** Сенсорные системы в робототехнике. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 100 с.
13. **Егоров И. Н.** Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами // Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 192 с.
14. **Siciliano B., Villani L.** Robot force control. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 540. 146 p.
15. **Calanca A., Muradore R., Fiorini P.** A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots // IEEE/ASME transactions on mechatronics. 2015. Vol. 21, N. 2. P. 613–624.
16. **Серебряный В. В., Бошляков А. А., Огородник А. И.** Импедансное позиционно-силовое управление в роботах и механизмах с кинематическими замкнутыми цепями // Технологии аддитивного производства. 2019. Т. 1. № 1. С. 24–35.
17. **Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A. and Sukhanov A. N.** Parametrical analysis of vacuum contact devices for wall climbing robots // CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020. P. 67–74.

## Walking Robot for Moving on Vertical and Arbitrarily Oriented Surfaces

**V. V. Serebrennyj**, vsereb@bmstu.ru, **A. A. Boshlyakov**, boshlyakov@bmstu.ru,

**S. V. Kalinichenko**, kalinichenkosv@bmstu.ru, **A. I. Ogorodnik**, alexander.ogorodnik@bmstu.ru,

**K. V. Konvalov**, konvalov\_kv@bmstu.ru,

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, 105005, Russian Federation

*Corresponding author:* **Ogorodnik Alexander I.**, Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: alexander.ogorodnik@bmstu.ru

Accepted on July 27, 2021

#### Abstract

*The article deals with the design of a walking robot with gripping devices that allow the robot to move on arbitrarily oriented surfaces in space. Such robots are relevant primarily for the inspection of various industrial structures. A model of a two-support robot with gripping devices that allow it to be attached to support surfaces with a small curvature, but arbitrarily oriented in space, is proposed. To ensure attachment to the support surfaces, the robot is designed with five degrees of freedom. An important criterion is the possibility of dexterous movement on surfaces. One of the degrees of freedom of the robot was made linear, which makes it easier to step over obstacles and allows you to implement simpler walking algorithms. When the robot is attached to the supporting surfaces by two gripping devices at once, the kinematic chain is closed. This*

can lead to an increase in forces and moments in the robot's links. In this paper, it is applied to use two methods of controlling the drives of the links together — the implementation of impedance control by introducing feedback on the evaluation of the moment based on the motor currents and ensuring the pliability of the gripping devices due to its own elasticity. A mathematical simulation of the robot was carried out, which showed the possibility of reducing the forces in the robot links when attaching the robot to two support surfaces at the same time. The best results were achieved when controlling the current vector of a synchronous motor and using current signals to implement impedance control.

**Keywords:** Walking robot, vertical movement robot, control system, motion modeling, positional-force control

For citation:

Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Kalinichenko S. V., Ogorodnik A. I., Konovalov K. V. Walking Robot for Moving on Vertical and Arbitrarily Oriented Surfaces, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 585–593.

DOI: 10.17587/mau.22.585-593

## References

1. **Dethe R. D., Jaju S. B.** Developments in wall climbing robots: a review, *International journal of engineering research and general science*, 2014, vol. 2, iss. 3, pp. 33–42.
2. **Zhao Z., Shirkoohi G.** Climbing robot design for NDT inspection, *Human-Centric Robotics: Proceedings of CLAWAR 2017: 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2018, pp. 259–266.
3. **Kolhalkar N. R., Patil S. M.** Wall climbing robots: A review, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2012, vol. 1, iss. 5, pp. 227–229.
4. **Das A., Patkar U. S., Jain S., Majumder S., Roy D. N., Char S. K.** De-sign principles of the locomotion mechanism of a wall climbing robot, *Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, 2015, pp. 1–7.
5. **Syrykh N. V., Chashchukhin V. G.** Wall-climbing robots with permanent-magnet contact devices: design and control concept of the contact devices, *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2019, iss. 5, pp. 163–173 (in Russian).
6. **Gradetsky V. G., Knyazkov M. M.** Present and future trends of wall climbing robot's development for extreme conditions, *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2014, iss. 1, pp. 9–16 (in Russian).
7. **Averianov E. V., Kovalenko B. B., Kostin A. V., Pelepas E. I., Poduraev Yu. V., Yakovlev S. F.** Main aspects of domestic wall climbing robot design, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, iss. 8, pp. 23–27.
8. **Tovarnov M. S., Bykov N. V.** A mathematical model of the locomotion mechanism of a mobile track robot with the magnetic-tape principle of wall climbing, *Problemy Bashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2019, iss. 3, pp. 74–84.
9. **Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N.** Controlled movement of mobile robots on surfaces arbitrarily oriented, *Mocow, Nauka*, 2001, 359 p. (in Russian).
10. **Zhu H., Guan Y., Wu W., Zhou X., Zhang L., Zhang X. and Zhang H.** The superior mobility and function of W-Climbot — A bio-inspired modular biped wall-climbing robot, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Bio-mimetics, IEEE*, 2011, pp. 509–514.
11. **Serebrennyj V. V., Lapin D. V., Mokaeva A. A.** Experimental studies of the dynamics of a mobile robot with a vertical movement mechanism on magnetic caterpillar movers, *Problemy bashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2020, iss. 4, pp. 68–75 (in Russian).
12. **Yurevich E. I.** Sensor systems in robotics, *St. Petersburg, Izdatel'stvo Politehnicheskogo Universiteta*, 2013, 100 p.
13. **Egorov I. N.** Position-force control of robotic and mechatronic devices, *Izdatel'stvo Vladimirskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2010, 192 p.
14. **Siciliano B., Villani L.** Robot force control. Springer Science & Business Media, 2012. vol. 540, 146 p.
15. **Calanca A., Muradore R., Fiorini P.** A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015. vol. 21, iss. 2, pp. 613–624.
16. **Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Ogorodnik A. I.** Impedance position-force control in robots and mechanisms with kinematic closed chains, *Tekhnologii Additivnogo Proizvodstva*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 24–35.
17. **Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A. and Sukhanov A. N.** Parametrical analysis of vacuum contact devices for wall climbing robots, *CLAWAR 2020: 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Moscow, Russian Federation, 24–26 August 2020, pp. 67–74.