

А. А. Тачков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., tachkov@bmstu.ru,
С. В. Калинин, канд. техн. наук, нач. отдела, **А. Ю. Малыхин**, нач. сектора,
 НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами

Для проектирования шагающих автономных роботов вертикального перемещения предложена имитационная модель системы удержания на шероховатой поверхности с помощью вакуумных захватов. Приведены результаты статистического моделирования пошагового движения робота по вертикальной поверхности и дана оценка эффективности применения бортового вакуумного ресивера для его удержания. Установлено, что распределение числа шагов по вертикальной поверхности до остановки подчиняется гамма-распределению. В случае если рассматриваются только шаги, последующие за первым, то их распределение — экспоненциальное.

Ключевые слова: робот вертикального перемещения, термодинамическая модель, вакуумный захват, вакуумный ресивер, метод Монте-Карло, экспоненциальное распределение, внешнее проектирование, эффективность

Введение

Актуальность проблемы надежного (без отрыва) перемещения малогабаритных роботов с вакуумными захватами по вертикальным неферромагнитным поверхностям и поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту, при выполнении целого ряда технологических операций отмечалась в работах [1–5]. По способу перемещения подобные роботы можно разделить на две категории: шагающие роботы с поочередным контактом одной из групп вакуумных захватов (ВЗ) (рис. 1, а, б), обеспечивающих фиксацию на поверхности, и колесные/гусеничные роботы с постоянным контактом ВЗ (рис. 1, в). Для создания разрежения в полостях захватов роботы вертикального перемещения (РВП) шагающего типа чаще всего

оснащаются эжекторами и вакуумными насосами, роботы второго типа — внутрикорпусными вентиляторными блоками, за счет которых РВП прижимается к поверхности через "скользящее" уплотнение [2].

Каждый из указанных способов создания вакуума обладает недостатками. Например, применение эжектора, как правило, требует подвода внешней пневмомагистрали с избыточным давлением не менее 0,4...0,6 МПа [1], что делает робота неавтономным. Использование вентиляторного блока позволяет сделать робота автономным, но данный способ является самым энергоемким из рассматриваемых из-за непрерывной работы вентилятора. Бортовые вакуумные насосы также обеспечивают автономность робота, но обладают низкой расходной характеристикой уже при величине вакуума в –60 кПа (за ноль принимается атмосферное давление). Тем не менее, подходя комплексно к проблеме выбора способа создания вакуума, можно сделать вывод о том, что для обеспечения продолжительной автономной работы малогабаритного РВП применение бортового вакуумного насоса является наиболее целесообразным.

В целях повышения эффективности применения данного способа для удержания робота на поверхности в различных исследованиях предлагаются его модификации. Например, в работе [4] рассматривается дооснащение вакуумной системы удержания специальной поршневой конструкцией переменного объема, управляемой двигателями постоянного тока с обратной связью по положению и увеличивающей суммарный запас вакуума. Более простой в плане технической реализации является схема с вакуумным ресивером постоянного объема (рис. 2), компенсирующим натекание воздуха, возникающее из-за неидеального уплотнения неровностей поверхности при фиксации на ней ВЗ, примененная для малогабаритного РВП [6]. Аналогичная схема также применяется и для крупногабаритного РВП массой 60 кг [7].

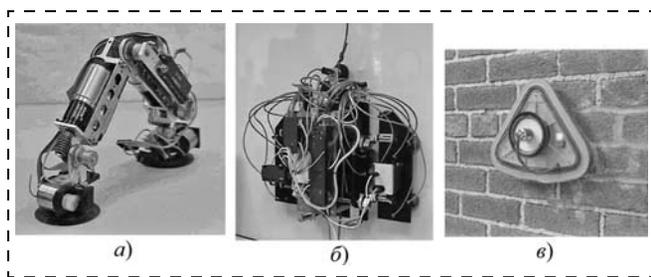


Рис. 1. Малогабаритные роботы вертикального перемещения: а — RAMR1 (США); б — экспериментальный робот (Чехия); в — City Climber prototype-II (США)

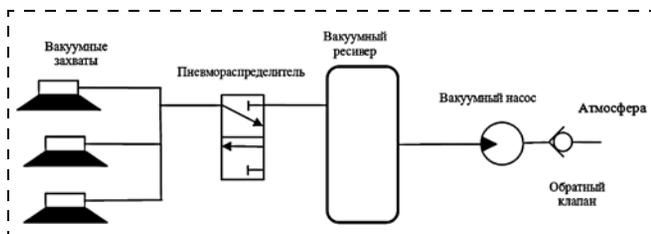


Рис. 2. Схема включения вакуумного насоса

Таким образом, исследование возможностей перемещения по реальной шероховатой поверхности роботов, в особенности малогабаритных, оснащенных бортовым вакуумным насосом с ресивером, является актуальным и представляет научный и практический интерес.

1. Постановка задачи исследования

Рассмотрим малогабаритный шагающий РВП, состоящий из модулей поступательного движения 1 и 2, корпуса 3, модуля вращательного движения 4 (рис. 3), и конструктивно аналогичный РВП, приведенному на рис. 1, б [8]. Каждый из модулей оснащен группами ВЗ 5, 6 по n и m штук соответственно. Каждый из захватов диаметром d снабжен уплотнительным контуром высотой $h_{упл}$ из материала с повышенной упругостью. Поступательное движение робота осуществляется посредством поочередной фиксации группы захватов 5 и группы 6 к поверхности движения и обеспечивается за счет вращения кривошипов 7 длиной l . Данная конструкция РВП выбрана для анализа в связи с постоянным шагом движения робота $2l$ и, соответственно, удобной алгоритмизацией модели. За один шаг принимается полный оборот кривошипа, т. е. перемещение робота на $2l$ (рис. 3).

Движение осуществляется по однородной вертикальной поверхности, радиус кривизны которой больше двух метров [3], имеющей местные дефекты: волнистость, шероховатость, трещины, т. е. взаимодействие робота с внешней средой носит вероятностный характер.

Каждый из модулей поступательного и вращательного движения оснащен индивидуальной вакуумной системой, состоящей из включенных параллельно N вакуумных насосов с расходной характеристикой $q = f(p)$ (p — абсолютное давление) и одного ресивера объемом V (рис. 2). Движение робота осуществляется до его первой остановки, т. е. до момента, когда робот не может сделать следующий шаг по истечении времени $t_{ф}$, отведенного на фиксацию захватов на поверхности, из-за превышения абсолютным давлением в полости захватов порогового значения $P_{пор}$. Отрыв РВП от поверхности происходит, если абсолютное давление в полости удерживающего захвата во время движения робота превышает пороговое значение $P_{кр}$. Выбор пороговых значений определяется массой робота.

В качестве показателей эффективности работы принимаются следующие показатели:

- математическое ожидание числа шагов до первой остановки робота M_S ;
- вероятность сделать более одного успешного шага P_1 ;
- условная вероятность P_{AB} отрыва, если сделано более одного шага;
- математические ожидания M_{T1} и M_{T2} рабочего цикла насосов модулей поступательного и враща-

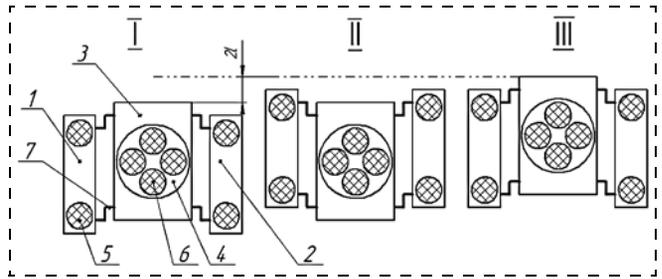


Рис. 3. Стадии движения РВП (I — исходное положение РВП, II — перенос модуля поступательного движения, III — завершение шага)

тельного движения соответственно для числа шагов, сделанных РВП до первой остановки;

- математические ожидания M_1 и M_2 рабочего цикла насосов модулей поступательного и вращательного движения соответственно в расчете на один шаг.

Для обоснования на этапе внешнего проектирования требований к автономному РВП на основе предложенных показателей необходимо разработать математическую модель робота с системой удержания на базе вакуумного насоса и ресивера и провести с помощью нее исследование движения РВП, зависящего от случайных факторов.

2. Разработка имитационной модели системы удержания РВП

Для определения оценок показателей эффективности, характеризующих возможности перемещения проектируемого робота, предлагается имитационная модель, общая структура которой представлена на рис. 4. В ее состав входят следующие частные

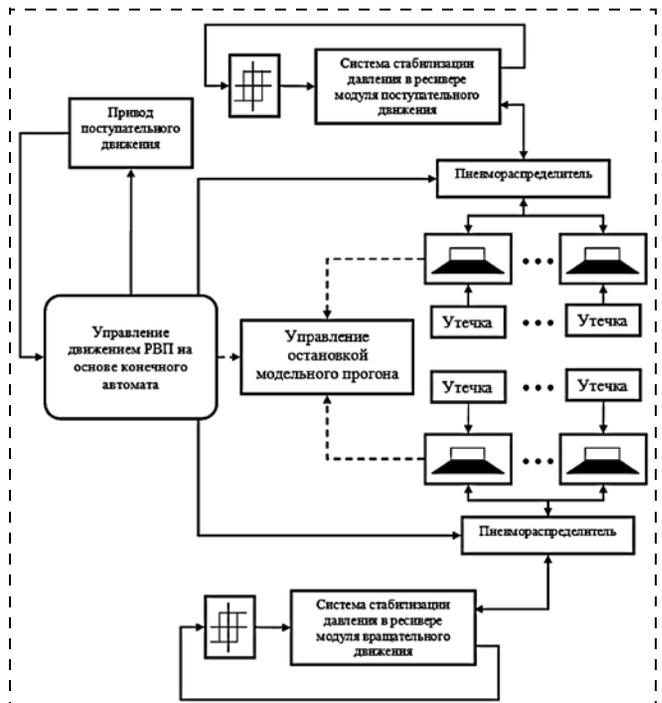


Рис. 4. Общая структура имитационной модели

модели: термодинамическая модель системы стабилизации давления в ресиверах модулей поступательного и вращательного движений; термодинамическая модель изменения давлений в полостях ВЗ в зависимости от утечки между уплотнительным контуром захвата и поверхностью движения; статистическая модель формирования утечки в зависимости от местных дефектов поверхности на текущем шаге робота; статистическая модель распределения трещин на поверхности движения; модель формирования шагов робота на основе конечного автомата и логическая модель управления остановкой одного прогона (численного эксперимента) при возникновении отрыва робота или выполнения максимально возможного числа шагов, заданного на этапе инициализации модели.

Ниже представлено математическое описание основных подсистем, использующихся в имитационной модели.

2.1. Модель вакуумной системы

Предлагаемая модель вакуумной системы базируется на первом начале термодинамики и результатах работы [9] по моделированию системы удержания РВП:

$$\frac{d}{dt}(U + E) = \sum \dot{A} + \sum \dot{Q} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{c_i^2}{2} + u_i \right), \quad (1)$$

где U — внутренняя энергия газа (воздуха); E — механическая энергия воздуха; \dot{A} — мощность внешних сил; \dot{Q} — скорость поглощения теплоты; \dot{m}_i —

массовый расход воздуха; h_i — удельная внутренняя энергия (энтальпия) расхода \dot{m}_i ; $c_i^2/2$ — удельная кинетическая энергия массового расхода \dot{m}_i ; u_i — работа сил проталкивания (удельная потенциальная энергия) расхода \dot{m}_i .

Принимая допущения, что изменение механической энергии мало, температура воздуха T постоянна, а $c_{i, \max}^2/2 \ll h_i$ [9], и учитывая, что $\frac{d}{dt} U = c_V(\dot{m} T + m \dot{T})$, $p \dot{V}_\Pi + \dot{p} V_\Pi = R(\dot{m} T + m \dot{T})$, $h = c_p T$ и $k = c_p/c_V$ (где $k = 1,4$ — показатель адиабаты; R — газовая постоянная; c_p , c_V — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме воздуха соответственно; V_Π — объем внутренней полости присоски), уравнение (1) для вакуумного захвата преобразуется к виду

$$\dot{p}_\Pi V_\Pi + p \dot{V}_\Pi = kRT \dot{m}_i. \quad (2)$$

Изменение объема вакуумного захвата в зависимости от массового расхода варьируется в диапазоне $[V_{\min}; V]$, где V_{\min} — минимальный объем захвата после его присасывания к поверхности. Учитывая, что $\dot{m}_i = \rho q_i = \rho \dot{V}_\Pi$ (q_i — объемный расход, ρ — плотность воздуха), выражение (2), описывающее изменение давления в полости вакуумного захвата, можно представить в виде

$$\dot{p} = \frac{\dot{V}_\Pi}{V_\Pi} (kRT\rho - p), \quad (3)$$

где $\dot{V}_\Pi = q_{\text{УТ}} - vS_{\text{сеч}}$; $q_{\text{УТ}}$ — объемный расход натекающего воздуха в полость захвата; $S_{\text{сеч}}$ — площадь сечения пневмораспределителя, соединяющего захват с вакуумным ресивером; $v = \sqrt{\frac{2RT(p_p - p)}{p}}$ — скорость истечения вакуума из ресивера в захват; p_p — давление в ресивере. Скорость истечения v ограничена критической скоростью $v_{\max} = \sqrt{\frac{2kRT}{k+1}}$ [10, 11].

Изменение давления p_p в ресивере объемом V , создаваемое вакуумным насосом с расходной характеристикой $q(p)$, описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$\dot{p}_p = -\frac{p_p q(p)}{V}. \quad (4)$$

Модель вакуумной системы, базирующаяся на уравнениях (3), (4), для одного вакуумного захвата (например, модуля поступательного движения) в виде структурной схемы представлена на рис. 5, а. Давление в ре-

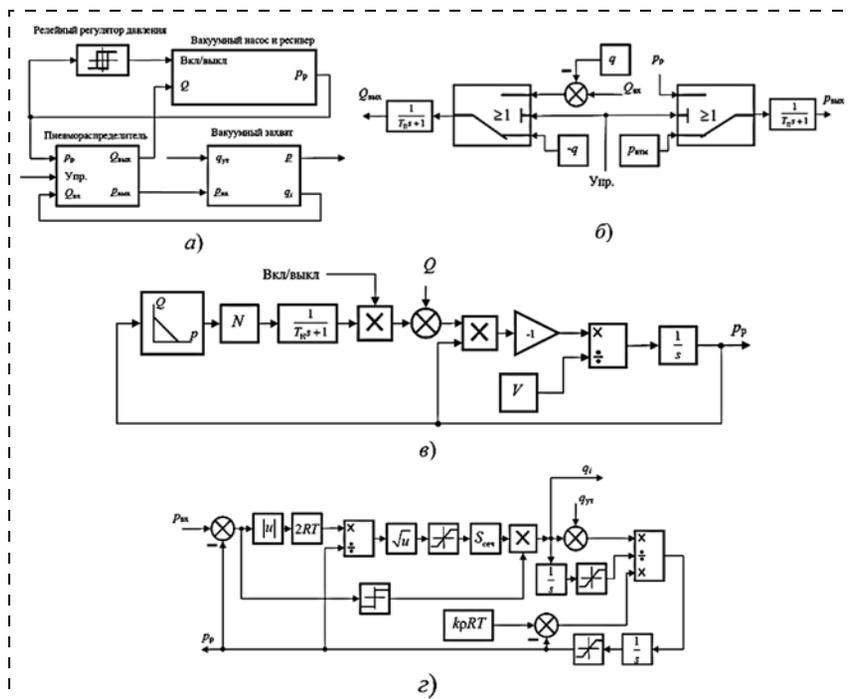


Рис. 5. Структурные схемы модели вакуумной системы: а — общая модель; б — модель пневмораспределителя; в — модель системы стабилизации давления в ресивере; г — модель вакуумного захвата

сивере поддерживается с помощью N вакуумных насосов, за включение которых отвечает релейный регулятор, поддерживающий заданное давление. Модель блока "вакуумный насос и ресивер" в виде структурной схемы приведена рис. 5, в. Здесь в качестве возмущающего воздействия Q выступает расход вакуума через пневмораспределитель, возникающий из-за разности давлений в ресивере и ВЗ. Модель распределителя (рис. 5, б) работает следующим образом: в исходном состоянии вакуумный захват соединен с атмосферой и отсоединен от ресивера, который работает автономно. При подаче управляющего воздействия "Упр." на пневмораспределитель в момент закрепления ВЗ к поверхности происходит переключение канала захвата на ресивер, при этом модель имитирует возникающий поток натекающего из захвата в ресивер воздуха с расходом $Q_{\text{ВЫХ}}$. Апериодический характер изменения давления $p_{\text{ВЫХ}}$ и расхода $Q_{\text{ВЫХ}}$ в канале "ресивер — ВЗ" учтен в виде инерционных звеньев. Процесс изменения давления в полости захвата моделируется структурной схемой (рис. 5, з) в соответствии с уравнением (3).

Для n вакуумных захватов, подключенных параллельно к ресиверу через общий коллектор (см. рис. 4), суммарный расход $Q_{\text{ВЫХ}}$ определяется как алгебраическая сумма утечек q_i каждого из захватов.

2.2. Модель образования утечек при контакте вакуумного захвата и поверхности

Наибольший интерес в предлагаемой модели представляет схема моделирования натекания воздуха с объемным расходом $q_{\text{УТ}}$ из внешней среды в вакуумный захват в месте его контакта с поверхностью движения. В отличие от подхода немецких исследователей Шмидта и Бернса [12], основанного на анализе высоты местных неровностей на видеоизображении виртуальной поверхности перемещения робота с последующим расчетом утечки по эмпирической формуле, в модели использовано объединение "щелевой модели протекания" [13] и статистического закона распределения неровностей поверхности. Щелевая модель основывается на ме-

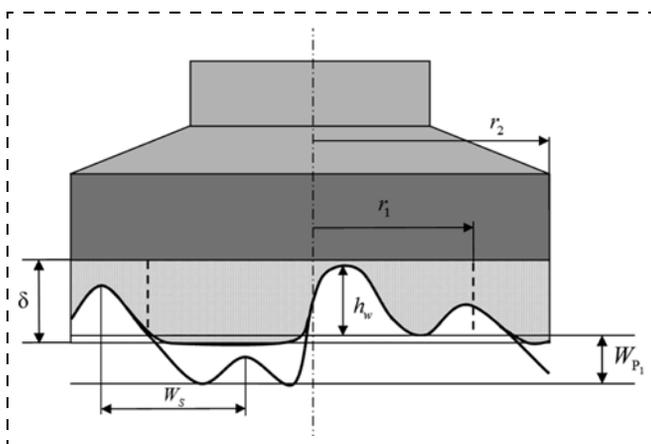


Рис. 6. Контактное взаимодействие двух поверхностей

ханике контактного взаимодействия плоских волнистых поверхностей (рис. 6), одна из которых (уплотнительный контур захвата) деформируема. В качестве допущения принимается условие, что утечка происходит в радиальном направлении между волнами.

В качестве модели волнистой поверхности принимается набор радиально расположенных волн, имеющих в верхней части цилиндрическую форму. Число волн определяется выражением $n_w = \pi(r_1 + r_2)/W_S$, где r_1 — внутренний радиус захвата до контурного уплотнителя; r_2 — радиус захвата; W_S — длина волны. Учитывается случайный разброс амплитуд волн.

При приложении сжимающей силы $F = F_0 + \Delta p S$ происходит деформация поверхности и образуется зазор h , определяемый выражением [14]

$$h = W_{p_1} + W_{p_2} + h_w - \delta, \quad h \geq 0, \quad (5)$$

где F_0 — начальная сила прижатия, например сила тяжести; Δp — разность давлений между атмосферным и давлением внутри полости захвата; S — его эффективная площадь; W_{p_1} и W_{p_2} — высоты сглаженного профиля поверхности и уплотнительного контура соответственно; h_w — высота волны; δ — деформация контакта.

Деформация δ в выражении (5) определяется как [11]

$$\delta = \frac{F}{L} (\lambda_1 + \lambda_2) \left(\ln \left(\frac{L^3}{4Fr_w(\lambda_1 + \lambda_2)} \right) + 2,38629 \right),$$

$$\delta < \varepsilon h_{\text{упл}},$$

где L — длина линии контакта ($L = r_1 - r_2$); $\lambda_i = (1 - \mu_i^2)/(\pi E_i)$, $i = 1, 2$; μ — модуль Пуассона; E — модуль Юнга; r_w — радиус волны; ε — относительная остаточная деформация уплотнительного материала.

Площадь утечки оценивается следующим образом: $S_{\text{УТ}} = W_S \sum_{i=1}^{n_w} h_i$. По оцененному значению $S_{\text{УТ}}$ рассчитывается объемный расход утечки $q_{\text{УТ}} = v S_{\text{УТ}}$ по аналогии с разделом 2.1. Таким образом, происходит замыкание термодинамической модели вакуумной системы, описывающей взаимодействие РВП с внешней средой.

Важным вопросом при моделировании утечек является выбор статистического закона распределения высот h_w для различных типов поверхностей. Разными авторами [13, 15, 16] предлагается ряд законов: экспоненциальный, логнормальный, гамма-распределение, бета-распределение. В последующем моделировании авторами используется логнормальный закон распределения высоты отдельных волн. Для моделирования локальной неровности поверхности с получением случайного результата в соответствии с заданным законом распределения, или, другими словами, "розыгрыша", вся поверхность

разбивается на квадратные ячейки с ребром d , для каждой из которых разыгрывается свое значение площади утечки $S_{ут}$.

2.3. Модель распределения трещин на поверхности

Помимо того, что реальная поверхность движения характеризуется наличием местных шероховатостей, при моделировании важно учитывать также наличие трещин, размеры и расположение которых носят стохастический характер и определяются степенью износа поверхности [17, 18].

В работе [17] приведены значения математических ожиданий основных параметров трещин, зависящие от степени износа элемента конструкции, по которому осуществляется перемещение РВП:

$$M(L_{тр}) = 1,3U, \quad (6)$$

где $L_{тр}$ — длина трещины, см; U — износ, %;

$$M(f) = 0,57\sqrt{U}, \quad (7)$$

где f — плотность расположения трещин на квадратном метре поверхности.

Из работы [19] известно, что случайные значения длины трещин аппроксимируются показательным распределением:

$$P(L_{тр}) = \frac{1}{M(L_{тр})} e^{-\frac{L_{тр}}{M(L_{тр})}}, \quad (8)$$

при этом трещины имеют одинаковую ориентацию (для определенности — вертикальную) и образуют на поверхности пуассоновский ансамбль плотностью $M(f)$, а распределение расстояния между центрами ближайших трещин описывается распределением Рэлея с математическим ожиданием $M(r) = 1/(2\sqrt{M(f)})$.

Так как в фиксированный момент времени на площади $S = 1 \text{ м}^2$ содержится n_2 трещин, то для розыгрыша их распределения в модели используется разбиение площади S на прямоугольные участки длиной 1 м и шириной $M(r)$ [19]. Из условия однородности поля трещин следует, что среднее число трещин n_1 на одном участке разбиения равно $n_1 = \sqrt{n_2}/2$ [19, 20]. В соответствии с формулами (6)–(8) авторами реализован алгоритм случайного распределения трещин на поверхности для одной реализации статистического испытания, не приведенный в работе из-за громоздкости своей записи. Разбиение исходной поверхности в алгоритме осуществляется на ячейки с длиной ребра d . В качестве генераторов случайных чисел для равномерного распределения и распределения Пуассона используются генераторы псевдослучайных величин, входящих в пакеты универсальных сред моделирования, например MATLAB. В результате работы алгоритма для одного прогона модели формируются два двумерных массива, один из которых содержит

значения площади утечки каждой из ячеек, а другой — признак наличия трещины, эквивалентный зазору h более 10 мм. Таким образом, для каждого из захватов в произвольный момент времени движения робота определены площади утечек.

2.4. Модель управления поступательным движением на основе конечного автомата

Моделирование процесса пошагового движения робота по поверхности реализуется на основе конечного автомата, в котором выделено 10 состояний, в которых пребывает РВП: Z_1 — "инициализация"; Z_2 — "начало движения"; Z_3 — "неудачное закрепление в начале работы"; Z_4 — "ожидание команды"; Z_5 — "ВЗ модуля поступательного движения подключены к вакуумной магистрали"; Z_6 — "ВЗ модуля поступательного движения отключены от вакуумной магистрали"; Z_7 — "ВЗ модуля вращения подключены к вакуумной магистрали"; Z_8 — "ВЗ модуля вращения отключены от магистрали"; Z_9 — "полшага вперед"; Z_{10} — "полшага назад".

Диаграмма состояний РВП приведена на рис. 7, нумерация состояний на рисунке соответствует порядку перечисления состояний.

Переходы между состояниями записаны условно, и их полная расшифровка в настоящей работе не приводится, так как подобная процедура значительно увеличивала бы объем статьи. В качестве примера можно указать, что условие перехода x_{6_1} имеет следующую полную форму записи: "если давление в расположенных слева ВЗ модуля поступательного движения выше 90 кПа и давление в захватах, расположенных справа, выше 90 кПа (ВЗ "отлипли" от поверхности движения)", условие перехода x_{8_1} : "если давление в ВЗ модуля вращения выше 90 кПа и прошло более 1 секунды", а условие $x_{8_1_1}$ — "назад сделано два шага". Маленькими кружками на рис. 7 в соответствии с нотацией диаграмм состояний Харела обозначено ветвление сложных вложенных условий.

Логическая модель управления остановкой одной реализации численного эксперимента, например в случае отрыва робота, реализована на моделях R-S-триггеров, и ее подробное описание в настоящей работе не приводится.

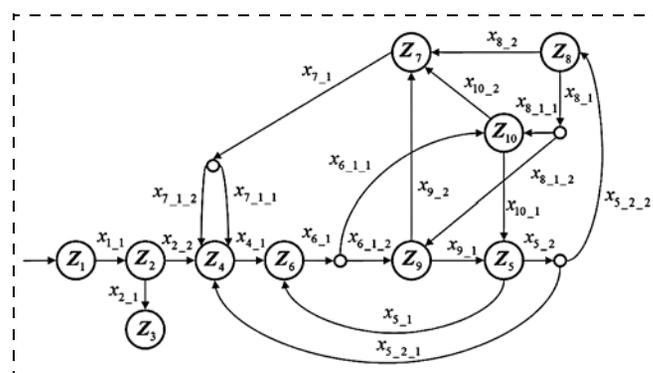


Рис. 7. Диаграмма состояний при формировании движения РВП

3. Статистическое моделирование системы удержания. Оценка ее эффективности

При проектировании системы удержания перемишающегося по шероховатой поверхности РВП необходимо учитывать, как это отмечено в постановке задачи, вероятностные факторы его взаимодействия с внешней средой. Таким образом, возникает необходимость проведения статистического моделирования движения РВП с помощью разработанной модели.

Для проведения такого моделирования предложенная в разделе 2 комплексная модель была реализована в пакете MATLAB с использованием расширений *Simulink* и *Stateflow*. Предварительная проверка адекватности модели заключалась в сравнительной оценке результатов численного и физического моделирования вакуумной системы. В роли физической модели выступал макет вакуумной системы, состоящий из вакуумного насоса с расходной характеристикой $Q(p) = 0,08p - 2$ (Q — л/мин, p — кПа), ресивера объемом 300 см³ и пневмораспределителя с пропускной способностью 15,7 л/мин при нормальных условиях. В качестве преобразователя давления использовали датчик МРХА4115А6U производства фирмы Motorola. Численный эксперимент проводился для модели, структурная схема которой раскрыта в разделе 2.1 (см. рис. 5, в).

Сравнительные результаты численного и физического моделирования для случая откачки воздуха из ресивера приведены на рис. 8, а. На рис. 8, б представлены результаты моделирования при откачке воздуха из ресивера, но при наличии утечки с объемным расходом 3 л/с через дросселирующее отверстие. Как видно из приведенных графиков, максимальное расхождение результатов на всем временном интервале моделирования не превышает 5 кПа (динамическая ошибка моделирования не превышает 10 %), что подтверждает адекватность модели и позволяет перейти непосредственно к имитационному моделированию.

Серию статистических экспериментов проводили для следующих типовых условий:

- параметры окружающей среды: атмосферное давление $p_{\text{атм}} = 101,3$ кПа, $T = 293$ К, $R = 287$ Дж/кг · К, $\rho = 1,205$ кг/м³, $k = 1,4$;
- параметры вакуумной системы: число присосок $n = m = 4$, объем полости одной присоски $V = 1 \cdot 10^{-6}$ м³, эффективный диаметр присоски $d = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м, проходная площадь сечения вакуумных трубок $S_{\text{сеч}} = 7,85 \cdot 10^{-7}$ м²;
- параметры поверхности движения: $\mu_1 = 0,2$; $E_1 = 2 \cdot 10^{10}$ Па; $W_{p_1} = 3,53 \cdot 10^{-4}$ м;
- параметры уплотнительного контура присоски: $\mu_2 = 0,2$; $E_2 = 7 \cdot 10^5$ Па; $r_2 = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м; $r_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $h_{\text{упл}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\varepsilon = 0,533$;
- длина ребра ячейки, на которые разбита площадь поверхности движения, $d = 0,025$ м, максимальное время, отведенное на фиксацию захвата, $t_{\text{ф}} = 5$ с.

Законы распределения случайных величин:

- распределение высоты h неровности поверхности — логнормальное с плотностью распределения

$$f(h) = \frac{e^{-2(\ln h - 3,8 \cdot 10^{-4})^2}}{1,253h} \quad (\text{параметры распределения } \mu = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м, } \sigma = 0,5);$$

- распределение степени износа поверхности — равномерное в диапазоне 0...50 % (розыгрыш числа и расположения трещин проводился в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 2.3).

Варьируемые факторы: шаг РВП $l = \{d, 2d, 3d\}$, число насосов $N = \{1, 2\}$, объем ресивера $V_{\text{рес}} = \{10, 50, 100, 400, 1000\}$. Заданное значение доверительного интервала для оценки математического ожидания числа шагов — $d_m = 0,1$ (для $M < 1$) и $d_m = 0,15$ для $M \geq 1$, уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Моделирование проводили по схеме Бернулли до первой остановки робота. Прогон останавливали при фиксировании отрыва РВП от поверхности при достижении в системе удержания критических значений давления. Движение РВП начиналось после создания разрежения в ресивере на уровне 30 кПа. Таким образом, в результате статистического моделирования авторами был проведен полный фактор-

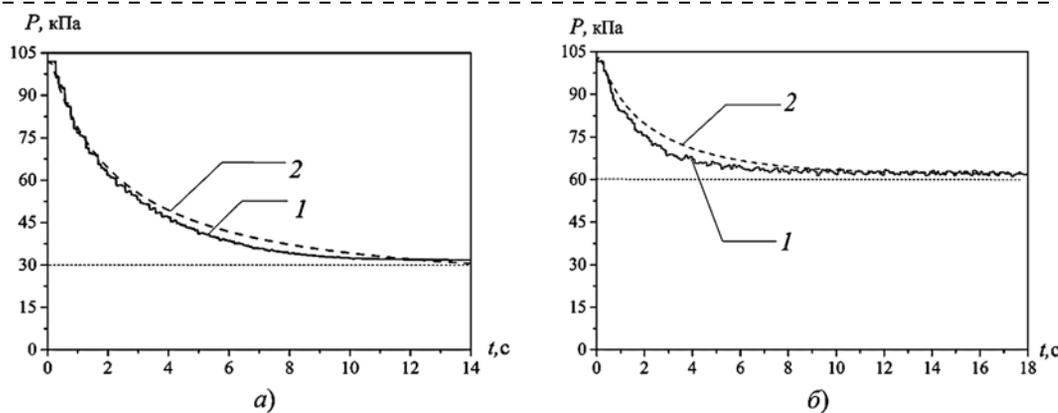


Рис. 8. Результаты численного и физического моделирования вакуумной системы (1 — физическая модель; 2 — численная модель): а — откачка вакуумным насосом воздуха из ресивера; б — откачка воздуха при наличии утечки 3 л/с

**Результаты статистического моделирования
эффективности вакуумной системы**

N	$V_{\text{рес}}, \text{см}^3$	M_S	P_1	P_{AB}	$M_{T1}, \%$	$M_{T2}, \%$	$M_1, \%$	$M_2, \%$
1	10	1,179	0,233	0,0018	51,03	50,95	40,82	40,51
	50	1,195	0,246	0,0075	43,15	43,74	33,65	33,89
	100	1,297	0,259	0,0175	41,71	41,02	29,71	28,93
	400	2,35	0,392	0,02857	61,79	67,79	23,83	26,14
	1000	4,946	0,599	0,0318	73,23	80,57	12,35	13,58
2	10	4,464	0,509	0,0045	47,8	46,53	8,25	7,71
	50	4,473	0,518	0,0061	46,71	44,77	7,98	7,3
	100	4,487	0,527	0,0097	45,36	43,75	7,65	7,16
	400	5,511	0,573	0,026	58,79	60,64	8,21	8,3
	1000	11,595	0,761	0,0296	61,67	67,92	2,86	3,15

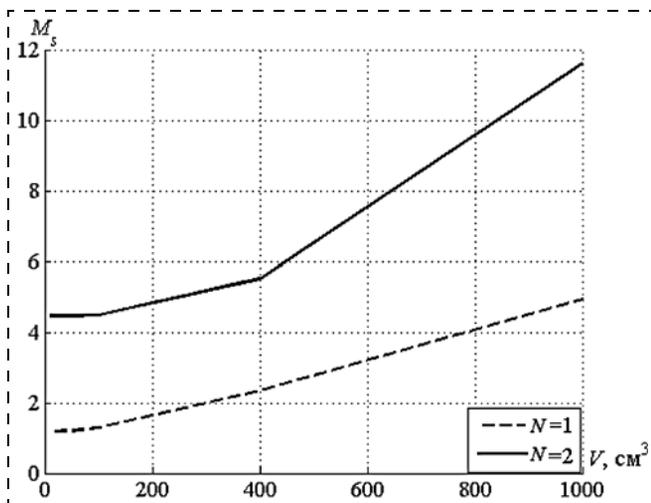


Рис. 9. Пример результатов статистического моделирования: зависимость математического ожидания числа шагов от объема бортового ресивера для одного и двух насосов

ный эксперимент (для трех факторов) с общим числом испытаний на стратегическом уровне его планирования — 30. Число прогонов для каждого испытания (строки плана) на тактическом уровне

планирования эксперимента определяли по оценке выборочного математического ожидания случайного события M_S и автоматически варьировали для каждого из испытаний. Общее число прогонов модели превысило 146 000. Вычисление показателей M_1 и M_2 проводили по значениям показателей M_{T1} , M_{T2} , M_S с учетом ковариации между M_{T1} и M_S , M_{T2} и M_S соответственно. Результаты моделирования для $l = d$ представлены в таблице.

Из таблицы видно, что с ростом объема ресивера увеличивается среднее число шагов, сделанное РВП, и растет вероятность выполнения более одного шага, но при этом, естественно, увеличивается и условная вероятность совершить отрыв от поверхности движения.

Также следует отметить и обратную зависимость времени работы насосов от объема ресивера из расчета на один шаг. На рис. 9 приведены графические зависимости среднего числа шагов РВП в зависимости от объема ресивера для одного и двух насосов. Как следует из графиков, объем ресивера при заданной производительности вакуумного бортового насоса должен быть не менее 400 см³. Эффект от использования ресивера (фактически выполняющего роль конденсатора) объясняется тем, что во время движения запас разреженного воздуха идет на компенсацию расхода утечек в вакуумных захватах, уменьшая общее время работы насоса во время движения.

Данный факт не противоречит закону сохранения энергии, так как энергия, запасенная до начала движения, полностью расходуется во время этого движения.

При этом работа насоса, затрачиваемая на выполнение одного шага при любом объеме ресивера, будет постоянной. При большем объеме ресивера увеличивается время работы насоса на этапе подготовки к движению РВП, соответственно увеличивается по времени этап подготовки робота к работе,

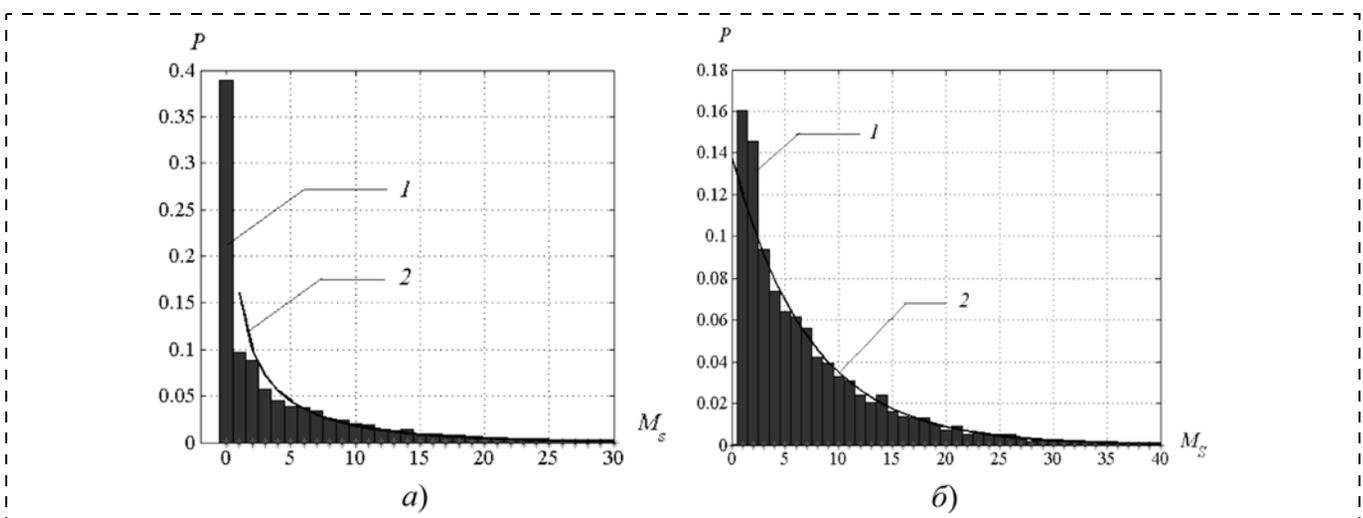


Рис. 10. Распределение числа шагов робота до первой остановки при $N = 2$ и $V = 100 \text{ см}^3$: а — с учетом неудач на первом шаге; б — при условии, что уже сделан первый шаг

но и наблюдается рост прямого показателя эффективности — числа шагов до первой остановки.

В ходе статистического моделирования было также установлено, что распределение числа сделанных роботом шагов до первой остановки подчиняется гамма-распределению (рис. 10, а), а если за начало отсчета принимать событие, что первый шаг выполнен успешно, то дальнейшее распределение числа шагов подчиняется экспоненциальному распределению (рис. 10, б). Статистические гипотезы относительно распределений проверялись методом моментов по выборке.

Данный результат хорошо согласуется со схемой, приводящей к гамма-распределению [21]: случайная величина, которая может быть интерпретирована в качестве времени до появления одного из многих событий (например, времени наработки до первого отказа), происходящих в некоторой последовательности, имеет приблизительно гамма-распределение.

Тем самым подтверждаются правильность проведенного моделирования и адекватность результатов, не противоречащих ни законам сохранения, ни основным положениям теории вероятности.

Заключение

Результаты проведенного исследования позволили сделать ряд выводов. Во-первых, применение имитационного моделирования позволяет обосновывать технические характеристики робота на основе анализа полученных в ходе моделирования выборочных показателей, например, оценивать минимальный объем ресивера по числу успешных шагов до первой остановки робота. Во-вторых, эффективность движения РВП, показателем которой является среднее число успешно сделанных шагов, при использовании бортового ресивера выше по сравнению со схемой без ресивера.

Также следует отметить, что интенсивность шагов РВП, определяемая техническими характеристиками робота, при условии выполнения первого шага, постоянна и не зависит от того, сколько робот уже прошел, т. е. такое движение робота по шероховатой поверхности является марковским процессом. А это, в свою очередь, позволяет заключить, что в дальнейших исследованиях, связанных с проектированием мобильных роботов и их систем управления, обосновано применение прикладной теории марковских случайных процессов.

Авторы выражают благодарность профессору А. С. Юценко за ряд ценных замечаний и советов, повысивших качество статьи.

Список литературы

1. Градецкий В. Г., Фомин Л. Ф. Динамические процессы в системах создания вакуума миниатюрных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 9. С. 10—14.

2. 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.
3. 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 и управление. 2013. № 8. С. 23—27.
4. Li Y., Li M., Sun L. Design and passable ability of transitions analysis of six legged wall-climbing robot // Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 5-8, 2007, Harbin, China. P. 800—804.
5. Silva M., Machado J., Tar J. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces // Proc. of the 6th IEEE Conference on Computational Cybernetics, November 27-29, 2008, Stara Lesna, Slovakia. P. 127—132.
6. Apostolescu T. C., Udrea C., Duminica D., Ionascu G., Bogatu L., Laurentiu Adrian Cartal Development of a climbing robot with vacuum attachment cups // Proceedings of International Conference MECANITECH'11, September 22-23, 2011, Bucharest. P. 258—267.
7. Nejadfard A., Schutz S., Schmidt D., Berns K. Design of safe reactional controller for chamber pressure in climbing robot CREA // Proc. of the 11th International Conference on informatics in control, automation and robotics, September 1-3, 2014 Vienna, Austria. P. 82—89.
8. Cernohorsky J., Horak M. Robotul Vertical Climber 2 design and implementation of control algorithm // Proc. of the 15th International Carpathian Control Conference, May, 28-30, 2014 Velke Karlovice, Czech. P. 86—90.
9. Wettach J., Hillenbrand C., Berns K. Thermodynamical modeling and control of an adhesion system for a climbing robot // Proc.s of the 20th International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. P. 2727—2732.
10. Гладышев Н. Н. Гидрогазодинамика: конспект лекций. СПб: СПбГТУРП, 2012. 159 с.
11. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов по специальности "Вакуумная техника". М.: Высшая школа, 1990. 320 с.
12. Schmidt D., Berns K. Development and applications of a simulation framework for a wall-climbing robot // Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo. P. 2321—2326.
13. Тихомиров В. П., Горленко О. А., Измеров М. А., Прокофьев А. Н. Механика контактного взаимодействия плоских волнистых поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 4 (40). С. 87—94.
14. Чаплыгин С. А. Контактное взаимодействие в уплотнительных устройствах // Механика и физика процессов поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сбор. науч. трудов. Вып. 6. Тверь: ТвГТУ, 2013. С. 114—124.
15. Демкин Н. Б. Компьютерные модели фрикционного контакта в трибологии // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвузовский сбор. науч. трудов. Вып. 2. Тверь: ТвГТУ, 2006. С. 4—13.
16. Горленко А. О., Матлахов В. П. Контактное взаимодействие цилиндрических поверхностей при трении скольжения // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвузовский сбор. науч. трудов. Вып. 2. Тверь: ТвГТУ, 2006. С. 14—20.
17. Брайла Н. В. Расчет математических ожиданий параметров трещин от степени износа элемента на основе статистических данных по аналогичным объектам // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1. С. 106—112.
18. Карпинтери А., Лачидонья Дж., Пуцци С. Прогноз развития трещин в полномасштабных конструкциях на основе анализа показателя b и статистики Юла // Физическая мезомеханика. 2008. № 3. С. 75—87.
19. Игнатович С. Р., Кучер А. Г., Якушенко А. С., Башта А. В. Моделирование объединения рассеянных поверхностных трещин. Вероятностная модель объединения трещин // Проблемы прочности. 2004. № 2. С. 21—32.
20. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2007. 480 с.
21. Строгалева В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 295 с.

Simulation and Evaluation of the Adhesion System Effectiveness for a Miniature Mobile Wall-Climbing Robot with Suction Cups

A. A. Tachkov, tachkov@bmsu.ru✉, S. V. Kalinichenko, A. Ju. Malykhin,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Tachkov Aleksandr A.**, Ph.D., Senior Researcher,
Bauman Moscow State Technical University, REC Robotics, Moscow,
105005, Russian Federation, e-mail: tachkov@bmsu.ru

Received on December 03, 2015

Accepted on December 07, 2015

The mechanisms of a wall-climbing walking robot (WCWR) envisage two functions: "attachment" and "locomotion". There are many factors involved in these processes, and one of them is an adhesion method. In this paper, a miniature mobile WCWR with suction cups and an on-board vacuum pump with an additional vacuum tank is discussed. The paper describes a complex simulation model of the suction cup's adhesion to rough surfaces, which can be used for WCWR's conceptual design. The model is based on statistical characteristics of vertical surfaces, statistical characteristics of cracks and on the analysis of interaction between the adhesion system and the surface. The simulation model is used to select the basic parameters of the adhesion system, such as the pump capacity, and the vacuum tank's volume by the Monte-Carlo method. The effectiveness of the robot adhesion system is evaluated with the help of this model. Application of the simulation model is explained on an example. We evaluated the effectiveness of the vacuum tank by the number of robot steps. The results of adhesion system simulation are presented. Besides, we determined the distribution law of the robot's locomotion before it stops. The simulation results reveal that the distribution of the total number of steps follows the gamma-distribution. If we consider only the subsequent steps after the first successful one, their distribution follows the exponential probability law.

Keywords: wall-climbing walking robot, thermodynamic model, suction cup, vacuum tank, the Monte-Carlo method, exponential distribution, conceptual design, effectiveness, simulation, MATLAB

For citation:

Tachkov A. A., Kalinichenko S. V., Malykhin A. Ju. Simulation and Evaluation of the Adhesion System Effectiveness for a Miniature Mobile Wall-Climbing Robot with Suction Cups, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 178—186.

DOI: 10.17587/mau/17.178-186

References

1. Gradeckij V. G., Fomin L. F. *Dinamicheskie processy v sistemah sozdaniya vakuuma miniaturnykh mobil'nykh robotov* (Dynamic processes in the vacuum systems of miniature mobile robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 9, pp. 10—14 (in Russians).
2. Gradeckij V. G., Knjaz'kov M. M. *Sostojanie i perspektivy razvitiya robotov vertikal'nogo peremeshhenija dlja jekstremal'nykh sred* (Gradeckij V. G., Knjaz'kov M. M. State and prospects of development of wall-climbing robots for extreme environments), *Robototekhnika i Tehniceskaja Kibernetika*, 2014, no. 1, pp. 9—16 (in Russians).
3. Aver'janov E. V., Kovalenko B. B., Kostin A. V., Pelepas E. I., Poduraev Ju. V., Jakovlev S. F. *Osnovnye aspekty sozdaniya otechestvennykh tehnologiceskikh mobil'nykh robotov vertikal'nogo peremeshhenija* (The main aspects of the creation of domestic technology wall-climbing mobile robots) *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 8, pp. 23—27 (in Russians).
4. Li Y., Li M., Sun L. Design and passable ability of transitions analysis of six legged wall-climbing robot, *Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, August 5-8, 2007, Harbin, China, pp. 800—804.
5. Silva M., Machado J., Tar J. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces, *Proc. of the 6th IEEE Conference on Computational Cybernetics*, November 27-29, 2008, Stara Lesna, Slovakia, pp. 127—132.
6. Apostolescu T. C., Udrea C., Dumitrica D., Ionascu G., Bogatu L., Laurentiu Adrian Cartal Development of a climbing robot with vacuum attachment cups, *Proc. of International Conference MECAHITECH'11*, September 22-23, 2011, Bucharest, pp. 258—267.
7. Nejadfard A., Schutz S., Schmidt D., Berns K. Design of safe reactional controller for chamber pressure in climbing robot CREA, *Proc. of the 11th International Conference on informatics in control, automation and robotics*, September 1-3, 2014 Vienna, Austria, pp. 82—89.
8. Cernohorsky J., Horak M. Robotul Vertical Climber 2 design and implementation of control algorithm, *Proc. of the 15th International Carpathian Control Conference*, May, 28-30, 2014 Velke Karlovice, Czech, pp. 86—90.
9. Wettach J., Hillenbrand C., Berns K. Thermodynamical modeling and control of an adhesion system for a climbing robot, *Proc. of the 20th International Conference on Robotics and Automation*, April 18-22, 2005, Barselona, Spain, pp. 2727—2732.
10. Gladyshev N. N. *Gidrogazodinamika: konspekt lekcij* (Fluid Dynamics: lecture notes), SPb, SPbGTURP, 2012, 159 p. (in Russians).
11. Rozanov L. N. *Vakuumnaja tehnika: uchebnik dlja vuzov po special'nosti "Vakuumnaja tehnika"* (Vacuum technology: a textbook for high schools in "Vacuum Technology"), Moscow, Vysshaja shkola, 1990, 320 p. (in Russians).
12. Schmidt D., Berns K. Development and applications of a simulation framework for a wall-climbing robot, *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, November 3-7, 2013, Tokyo, pp. 2321—2326.
13. Tihomirov V. P., Gorlenko O. A., Izmerov M. A., Prokof'ev A. N. *Mehanika kontaktного vzaimodejstviya ploskikh volnistykh poverhnostej* (The contact mechanics of flat undulating surfaces) *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2013, no. 4(40), pp. 87—94 (in Russians).
14. Chaplygin S. A. *Kontaktное vzaimodejstvie v uplotnitel'nykh ustroystvah* (Contact interaction in sealing devices), *Mehanika i fizika processov poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detalej tehnologiceskogo i jenergeticeskogo oborudovanija: mezhvuzovskij sbor. nauch. trudov*, vol. 6., Tver', TvGTU, 2013, pp. 114—124 (in Russians).
15. Demkin N. B. *Komp'yuternye modeli frikcionnogo kontakta v tribologii* (Computer models in tribology friction contact), *Mehanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej mashin: mezhvuzovskij sbor. nauch. trudov*, vol. 2, Tver', TvGTU, 2006, pp. 4—13 (in Russians).
16. Gorlenko A. O., Matlahov V. P. *Kontaktное vzaimodejstvie cilindricheskikh poverhnostej pri trenii skol'zhenija* (Contact interaction of cylindrical surfaces in sliding), *Mehanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej mashin: mezhvuzovskij sbor. nauch. trudov*, vol. 2 — Tver', TvGTU, 2006, pp. 14—20 (in Russians).
17. Brajla N. V. *Raschet matematcheskikh ozhidaniy parametrov treshhin ot stepeni iznosa jelementa na osnove statisticeskikh dannyh po analogičnym ob'ektam* (Calculation of expectations fracture parameters of the wear member on the basis of statistical data relating to similar objects), *Inženerno-Stroitel'nyj Zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 106—112 (in Russians).
18. Karpinteri A., Lacidogna G., Puzzi S. *Prognoz razvitiya treshhin v polnomasshtabnykh konstrukcijah na osnove analiza pokazatelya b i statistiki Julia*, *Fiziceskaja Mezomehanika*, 2008, no. 3, pp. 75 — 87 (in Russians).
19. Ignatovich S. R., Kucher A. G., Yakushenko A. S., Bashta A. V. *Modelirovanie ob'edinenija rassejannykh poverhnostnykh treshhin. Veroyatnostnaja model' ob'edinenija treshhin* (Simulation of scattered surface cracks associations. Probabilistic model of cracks), *Problemy Prochnosti*, 2004, no. 2, pp. 21—32 (in Russians).
20. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. *Teorija veroyatnostej i ee inženernye prilozhenija* (Probability theory and its engineering applications), Moscow, Vysshaja shkola, 2007, 480 p. (in Russians).
21. Strogalev V. P., Tolkacheva I. O. *Imitacionnoe modelirovanie: uchebnoe posobie* (Simulation: a tutorial), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. Je. Bauman (in Russians).