

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,
М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Л. Н. Кравчук**, вед. конструктор,
А. А. Крюкова, инженер, **Е. А. Семенов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
А. Н. Суханов, мл. науч. сотр., **В. Г. Чашухин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
 Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)

Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом¹

Рассматриваются процессы генерации вакуума в устройствах сцепления при движении мобильных роботов по сложным ферромагнитным или неферромагнитным поверхностям с использованием центробежного насоса и турбины, а также действие разработанной на основе аэродинамического прижима системы, предназначенной для осуществления движения по вертикальным поверхностям. Анализируется процесс получения разреженного воздуха в камере и возможность регулирования силы прижима за счет изменения величины зазора между поверхностями перемещения робота. Приводятся экспериментальные характеристики давления, силы отрыва и изменения процесса вакуумирования.

Ключевые слова: центробежный насос, турбина, мобильный робот, характеристики воздушного потока, управление силой прижатия

Введение

Многие современные манипуляционные роботы снабжены вакуумными захватами для работы с изделиями с различной формой поверхностей соприкосновения с захватом [1—5]. Мобильные роботы, в частности роботы, перемещающиеся по сложным поверхностям, а также по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту, осуществляют закрепление на поверхностях также посредством вакуумных контактных устройств [6—15]. Если качество или форма поверхностей заранее не известны, то для осуществления надежного сцепления возникает необходимость автоматического распознавания свойств поверхности и приспособления к ним, т.е. применения способов адаптации к поверхностям. Несмотря на достигнутые результаты проблема адаптации вакуумных контактных устройств к поверхностям с заранее неизвестными свойствами до настоящего времени полностью не решена и требует разработки новых подходов. Один из них основывается на развитии методов моделирования взаимодействия вакуумных контактных устройств с поверхностями различного качества. В работе [16] приведены результаты разработки различных моделей и анализ использования моделирования в целях оценки показателей эффективности действия таких контактных устройств. Обсуждаются наиболее развитые и

применяемые модели: имитационная модель системы удержания робота на вертикальной поверхности, модель системы с аэродинамическим прижимом. При создании моделей учитывается возможность образования утечек при контакте с поверхностью, хаотическое распределение трещин на поверхности и возможность управления поступательным движением робота на основе конечного автомата. Уделено внимание статистическому моделированию системы удержания робота на поверхности и оценке ее эффективности.

Получают развитие способы пассивной адаптации, основанные на оригинальных конструктивных решениях устройств контакта и применении материалов с необходимыми упругими и износостойкими свойствами и многоячеистой структурой. Предпосылки для разработки контактных устройств роботов различных размеров, обладающих свойствами приспособления к поверхностям неизвестного заранее качества, отмечались ранее во многих исследованиях, например в работах [17—21]. Определенный интерес представляют мобильные роботы, предназначенные для движения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. В этих случаях бывает необходимо использование методов активной и пассивной адаптации.

В данной статье рассматриваются процессы создания вакуума посредством центробежного насоса и вентилятора в целях адаптации робота к поверхности, вдоль которой происходит движение.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-04117.

1. Некоторые характеристики вихревого течения в устройствах генерации вакуума, спроектированных на основе центробежного насоса или турбины

Рассмотрим более подробно способы удержания робота на вертикальной поверхности с помощью различных устройств генерации вакуума. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлен мобильный робот с аэродинамическим прижатием к поверхности, основанным на работе центробежного насоса. Движение потоков воздуха между корпусом робота и поверхностью прижатия схематично представлено стрелками. Зазор x между корпусом робота и поверхностью перемещения может варьироваться. Здесь P_n и Q_n — давление воздуха и расход в области нагнетания; P_y и Q_y — разрежение и расход в области создания вакуума.

Аэродинамическое устройство прижима включает в себя насос и корпус робота, основание которого образует с поверхностью перемещения перемещенное пневматическое сопротивление. Поток через это сопротивление зависит от зазора x и отсутствует при x , близком к нулю. На рис. 1 цифрами обозначены области с различными характеристиками воздушного потока: 1 — область аэродинамического сопротивления; 2 — область нагнетания воздуха.

Другая конструкция робота с аэродинамическим прижатием предполагает использование турбины (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Конструкция данного робота аналогична конструкции робота с центробежным насосом, за исключением устройства генерации вакуума. Движение потоков воздуха между корпусом робота и поверхностью прижатия схематично представлено стрелками. В отличие от центробежного насоса потоки воздуха в данном случае проходят прямотоком сквозь турбину.

Скорость течения внутри вихревой камеры может быть выражена через радиальную и тангенциальную составляющие. Распределение тангенциальных скоростей выражается обычно в виде степенной зависимости [22], что учитывается в дальнейшем изложении при нахождении перепада и градиента давления:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{R}{r}, \quad (1)$$

где w_1 , v_1 — угловая и линейная тангенциальные скорости потока; w_2 , v_2 — угловая и линейная радиальные скорости потока; R — радиус вихревой камеры; r — переменный радиус образовавшегося вихревого потока.

Предположим, что градиент давления в радиальном направлении представляется в виде

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v_1^2}{r}. \quad (2)$$

Учитывая, что $v_1 = v_2 \left(\frac{R}{r} \right)$, получим

$$dp = \rho v_2^2 \frac{R^2}{r^3} dr. \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) в пределах от r_2 до R , получим

$$\Delta p = \frac{\rho v_2^2}{2} \left[\left(\frac{R}{r_2} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Давление на выходе в области вакуумирования равно

$$P_2 = P_a - \rho \frac{v_2^2}{2} \left[\left(\frac{R}{r_2} \right)^2 - 1 \right], \quad (5)$$

где P_a — атмосферное давление.

Рассмотрим зависимости между параметрами для центробежного насоса и вентилятора.

Если мощность вентилятора тратится только на создание вакуума, то давление, создаваемое вентилятором или центробежным насосом, можно рассчитывать по формуле

$$P = P_1 + \frac{\nu^2}{2} \rho. \quad (6)$$

Здесь P_1 — разрежение при всасывании; ν — скорость воздуха на выходе; ρ — плотность при условиях всасывания, которая зависит от газовой постоянной, температуры, давления и влажности.

Массовое количество воздуха, откачиваемого вентилятором, равно

$$m = \rho Q, \quad (7)$$

где Q — объемный расход.

Полное давление, развиваемое вентилятором, зависит от коэффициента формы лопаток ϕ , плотности ρ и скорости U_2 на выходе из крыльчатки, соответствующей наружной окружности, где расположены концы лопаток:

$$p = \phi U_2^2 \rho, \quad (8)$$

$\phi = 1,1 \dots 0,5$, в зависимости от формы лопаток:

- для лопаток, загнутых вперед, $\phi = 1,0 \dots 1,1$;
- для лопаток радиальных $\phi = 0,9 \dots 0,7$;
- для лопаток, загнутых книзу, $\phi = 0,7 \dots 0,5$.

Для соотношения параметров центробежного насоса и вентилятора справедлив закон пропорциональности. Давление, развиваемое центробежным насосом или вентилятором, пропорционально квадрату скорости вращения, т.е.

$$P_2 = \frac{w_2^2}{w_1^2} P_1; \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\Pi_1^2}{\Pi_2^2}. \quad (10)$$

Производительность насоса прямо пропорциональна средней скорости вращения:

$$Q_2 = \frac{w_1}{w_2} Q_1. \quad (11)$$

Здесь P_1 , P_2 и Q_1 , Q_2 — соответственно давление и расход при скоростях вращения w_1 и w_2 . Зависимость давления от расхода следующая:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \text{const}, \quad (12)$$

что позволяет определить давление, а значит, и силу прижатия к поверхности устройства сцепления. Мощность пропорциональна кубу скорости вращения колеса, т.е.

$$\frac{N_1}{Q_1^3} = \frac{N_2}{Q_2^3}, \text{ или } N_2 = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 N_1. \quad (13)$$

Для расчета рабочего режима в системе "центробежный насос — устройство сцепления с поверхностью" или "вентилятор — устройство сцепления с поверхностью" необходимо совместное решение уравнений зависимости давлений от расхода насоса или вентилятора и устройства сцепления.

Если в общем виде для насоса зависимость давления от расхода известна, а для устройства сцепления существует некоторое нелинейное соотношение между P и Q , в то же время зависящее от зазора x , которое можно найти экспериментально, то возможно графическое определение рабочей точки А.

Вид рабочих характеристик насоса и аэродинамического сопротивления устройства прижима, зависимости давления от расхода в относительных координатах представлены на рис. 3, а, б. Здесь P_n , P_y и Q_n , Q_y — соответственно давления и расходы в полостях насоса и камеры аэродинамического устройства прижима; $P_{но}$, P_{yo} и $Q_{но}$, Q_{yo} — усредненные значения давлений и расходов в полости насоса и камеры аэродинамического устройства прижима.

Нахождение точки рабочего режима показано на рис. 4, где совмещены зависимости давления от расхода для насоса 1 и аэродинамического сопротивления устройства прижима 2, 3 и 4. При этом график 2 соответствует номинальному режиму работы, а графики 3, 4 показывают отклонение от номинального режима. Эта точка определяет подачу необходимого количества воздуха данным устройством нагнетания в систему и развиваемое при этом давление. Таким образом, точка пересечения является рабочей точкой рассматриваемой системы. Включение обратной связи по давлению соответствует адаптивному режиму работы, когда в результате регулируемой адаптации графики 3 и 4 приближаются к графику 2, а совмещение их определяет завершение адаптации.

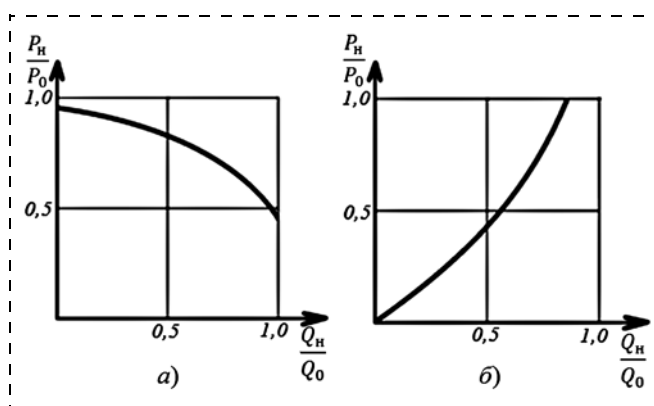


Рис. 3. Рабочие качественные характеристики насоса (а) и камеры аэродинамического устройства прижима (б)

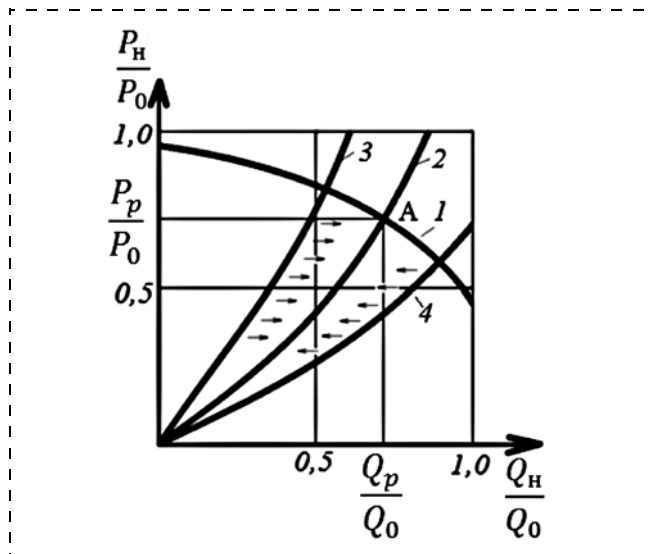


Рис. 4. Нахождение рабочего режима системы "вентилятор или насос — устройство прижима к поверхности": 1 — характеристика насоса; 2, 3, 4 — характеристика сопротивления устройства прижима к поверхности; А — рабочая точка

Аналогичная обратная связь по току, протекающему в обмотке возбуждения ротора двигателя, установленного на крыльчатке, определяет адаптацию по силе прижима.

2. Экспериментальное исследование создания вакуума с помощью центробежного насоса и вентилятора

Для определения рациональных характеристик зазора x , силы тока потребления I и силы прижатия F были проведены экспериментальные исследования. На рис. 5 представлена зависимость $F = F(x)$.

По результатам экспериментальных исследований была определена эффективная сила прижатия работа к поверхности перемещения от зазора x в диапазоне от 0,5 до 5 мм.

Как видно из полученных характеристик, сила F для роботов с центробежным насосом принимала максимальные значения при зазоре 0,5 мм. В экспериментах, проведенных с устройством генерации вакуума, основанном на турбине, сила F при-

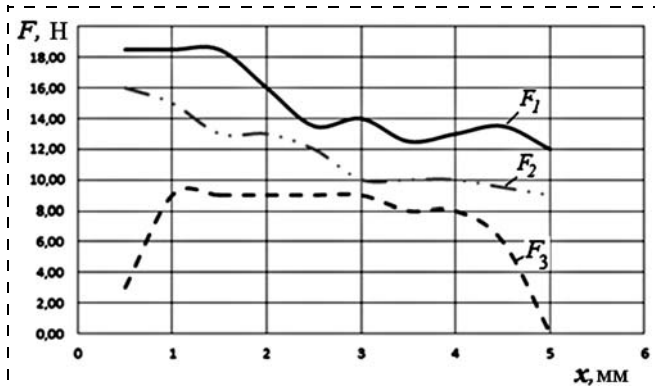


Рис. 5. Зависимость силы прижатия устройства сцепления с поверхностью от величины зазора x : F_1 — центробежный насос повышенной мощности; F_2 — центробежный насос; F_3 — турбина

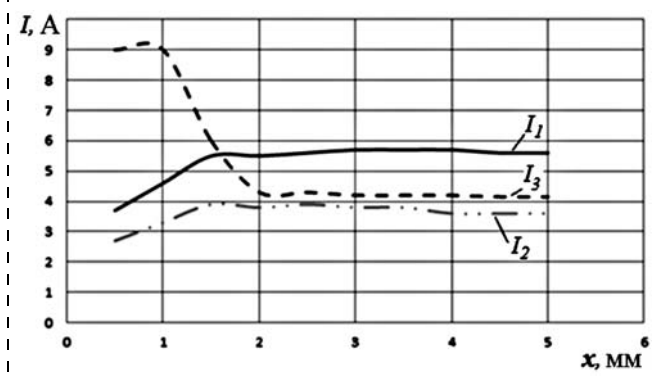


Рис. 6. Зависимость силы тока в обмотке ДПТ с независимым возбуждением устройства прижатия от величины зазора: I_1 — центробежный насос повышенной мощности; I_2 — центробежный насос; I_3 — турбина

нимала максимальные значения при зазоре между роботом и поверхностью, равном 1 мм.

Для минимизации потребления энергии были исследованы токи в обмотках возбуждения электродвигателей постоянного тока (ДПТ), приводящих в движение элементы конструкции устройств генерации вакуума. Как видно из полученных результатов (рис. 6), наименьшее потребление энергии роботом с центробежным насосом соответствует диапазону изменения зазора от 0,5 до 1 мм. Потребление энергии для приведения в движение турбины в роботе второго типа показало минимальное значение силы тока при зазоре от 2 до 5 мм.

В полости вакуумного контактного устройства сцепления с поверхностями давление P_2 зависит от зазора между плоскостью, по которой происходит перемещение робота, и торцевой поверхностью вакуумного контактного устройства, т.е. $P_2 = P_2(x)$.

При этом надо иметь в виду, что зависимость $P_2 = P_2(x)$ в общем случае нелинейна.

Если $x \geq x_{\text{пр}}$, то $P_2 = P_a$, вакуум не образуется и контакт с плоскостью перемещения нарушается. Если $0 \leq x < x_{\text{пр}}$, то $P_2 \leq \bar{P}_2$, где $\bar{P}_2$ — предельное давление, то образуется вакуум за счет работы тур-

бины вентиляторного или турбинного насоса за счет действия образующегося завихренного потока в емкости вакуумного контактного устройства, которой является емкость корпуса робота. Нормальная сила прижима корпуса робота, связанного с вакуумным контактным устройством, вычисляется по формуле

$$N = (P_a - P_2)S - kx,$$

где S — эффективная площадь контакта робота с поверхностью перемещения; x — переменный зазор между контактируемой поверхностью торца робота с поверхностью перемещения; k — коэффициент упругости эластичного материала торца корпуса робота.

Заключение

В статье приведены результаты исследований аэродинамического устройства прижима мобильного робота к поверхности движения с применением центробежного насоса и вентилятора. Рассматривается вихревое движение воздуха в таких устройствах аэродинамического прижима и основные параметры. Приводится графическое определение рабочих режимов, в том числе на основе методов адаптации. Получены экспериментальные зависимости силы прижатия устройства сцепления с поверхностью от зазора между поверхностями контакта в фазе перемещения робота. Анализируются характеристики силы тока в обмотке возбуждения электродвигателей постоянного тока, приводящих в движение элементы конструкции устройств генерации вакуума, в зависимости от зазора.

Список литературы

1. Краснослободцев В. Я., Скворцов В. Ю. Адаптивные пневмовакuumные захваты и опоры роботов. С.-Петербург: Техн. Университет, 1996. 100 с.
2. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы / Под ред. Е. П. Попова. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. Фу Г., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 620 с.
4. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы. Динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. 363 с.
5. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Самохвалов Г. В., Чашухин В. Г. Устройство для промывки гладких поверхностей. Патент № 132327 от 27.03.2013.
6. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Автономное вакуумное захватное устройство микроробота. Патент RU 2266810 C1, № 36, 2005 г.
7. Барабанов Г. П., Богданов С. В., Барабанов В. Г. Очувствительный вакуумный захват. Патент RU 2283751 C1, Бюл. № 26, 2005 г.
8. Сысоев С. Н., Кузнецов Р. В., Пронин А. В., Александров И. В., Пасечник М. А. Вакуумный захватный корректирующий модуль. Патент RU 2431561 C2. Бюл. № 29, 2011 г.
9. Longo D., Muscato G. Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental consideration // Proc. of 11th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2008), 08–10 September 2008, Coimbra, Portugal.
10. Luk B., Collie A., Billingsley J. Robug II: An intelligent wall climbing robot // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. 1991. Vol. 3 P. 2342–2347.

11. Schmidt D., Berns K., Ohr J. Analysis of sliding suction cups for negative pressure adhesion of a robot climbing on concrete walls // Adaptive Mobile Robotics. Proc. of the 15th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2012), 23–26 July 2012, Baltimore, USA. P. 813–820.

12. Illingworth L., Reinfeld D. Vortex attractor for planar and non-planar surfaces. U. S.A. Patent 6.619.922, Sept. 16. 2003.

13. Градецкий В. Г. Динамические процессы в миниатюрных мобильных роботах с вакуумным контактом к поверхностям перемещения // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 2. С. 104–105.

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

15. Каталог продукции компании Camozzi. URL: www.camozzi.com (дата обращения: 19.10.2016).

16. Тачков А. А., Калинин С. В., Малихин А. Ю. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 3. С. 178–186.

17. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Фомин Л. Ф., Чашухин В. Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 271 с.

18. 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.

19. Apostolescu T. C., Udrea C., Duminica D., Iorasco C., Bogato L., Laurentiu A. C. Development of a climbing robot with vacuum attachment cups // Proc. of International Conference MECHITECH'11, September 22–23. 2011. Bucharest. P. 258–267.

20. Watanabe M., Tsukagoshi H. Snail inspired climbing robot using fluid adhesion to travel on rough concrete walls and ceilings // Advanced in cooperative robotics. Proc. of CLAWAR-2016, 12–14 September 2016, London, UK. P. 79–87.

21. Yamaguchi T., Go T., Yamada Y., Nakamura T. Development of negative pressure suction mechanism in omnidirectional wall-climbing robot for inspection of airplanes // Advanced in cooperative robotics. Proceedings of CLAWAR — 2016, 12–14 September 2016, London, UK. P. 106–114.

22. Семидуберский М. С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. М.: Высшая школа, 1966. 262 с.

Vacuum Control in the Surface Attaching Devices of the Mobile Robots during their Movement under the Aerodynamic Attachment Force

V. G. Gradetsky, gradet@ipmnet.ru, M. M. Knyazkov, L. N. Kravchuk, A. A. Kriukova, E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chashchukhin,

Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 101-1, Pr. Vernadskogo, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Sukhanov Artjom N., Junior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: s_chernakova@rambler.ru

Received on July 30, 2016

Accepted on December 31, 2016

During the movement of the horizon mobile robots over different complex ferromagnetic and non-ferromagnetic surfaces, like walls, ceilings or slopes of various angles, their contacts with the surfaces can be realized by the attaching devices, which ensure an aerodynamic attachment force due to creation of vacuum. In industrial robotics such devices are designed for grasping objects with manipulators on the assembly lines. In the mobile robotics such devices are suitable for creation of an attachment force for the robots. The control system provides an aerodynamic attachment force due to control of the pressure level inside the vacuum area. This ensures adaptation for the mobile robots moving over the surfaces with different quality parameters. This paper describes creation of vacuum with a centrifugal pump and a turbine. It also presents an attachment device based on a centrifugal pump or a turbine, which can create an aerodynamic attachment force for movement of a mobile robot over the sloped surfaces. The air pressure inside the turbine depends on the shape of the blades, the air density and the circumferential speed of the blades. The air pressure created by the centrifugal pump or the turbine is proportional to the blades' rotary speed squared. The dependence of the air pressure on the air flow is obtained. This ensures calculation of the attachment force for the control system of a mobile robot. Simultaneous solving of the equations presented in this paper for the air pressure and the air flow provides an opportunity to obtain the operating modes for different types of the vacuum devices based on a centrifugal pump or a turbine. A possibility of the aerodynamic attachment force control by varying of the gap between the mobile robot and the surface is analyzed. Various parameters of air, such as density, average velocity and flow rate, are discussed. Creation of vacuum inside the vacuum area is considered. The experimental results concerning the pressure control, the attachment force and vacuum creation are presented.

Keywords: centrifugal pump, turbine, mobile robot, air flow parameters, aerodynamic attachment force control

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-08-04117.

For citation:

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Kriukova A. A., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Vacuum Control in the Surface Attaching Devices of the Mobile Robots during their Movement under the Aerodynamic Attachment Force, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 447–452.

DOI: 10.17587/mau.18.447-452

References

1. Krasnoslobodtsev V. Y., Skvorcov V. Y. *Adaptivnye pnevmovakuumnye zahvaty i opory robotov* (Adaptive pneumatic grippers and robots' legs), S.-Peterburg, Publishing house of SPb., Tekhn. Universitet, 1996, 100 p. (in Russian).
2. Popov E. P. *Sistemy ochuvstvleniya i adaptivnye promyshlennye roboty* (Feedback systems and adaptive industrial robots), Moscow, Mashinostroyeniye, 1985, 256 p. (in Russian).
3. Fu G., Gonsales R., Li K. *Robototekhnika* (Robotics), Moscow, Mir, 1989, 620 p. (in Russian).

4. Chernousko F. L., Bolotnik N. N., Gradeckij V. G., *Manipulyacionnye roboty. Dinamika, upravlenie, optimizatsiya* (Manipulators. Dynamics, control, optimization), Moscow, Nauka, 1989, 363 p. (in Russian).
5. Gradeckij V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Samohvalov G. V., Chashchuhin V. G. *Ustrojstvo dlya promyvki gladikih poverhnostej* (The device for plane surfaces cleaning), Patent № 132327, 27.03.2013 (in Russian).
6. Darincev O. V., Migranov A. B. *Avtonomnoe vakuumnoe zahvatnoe ustrojstvo mikrorobota* (Autonomous vacuum gripper for micro-robot), Patent RU 2266810 C1, № 36, 2005 (in Russian).
7. Barabanov G. P., Bogdanov S. V., Barabanov V. G. *Ochuvstvennyj vakuumnyj zahvat* (Vacuum gripper with feedback), Patent RU 2283751 C1, Byul. № 26, 2005 (in Russian).
8. Sysoev S. N., Kuznecov R. V., Pronin A. V., Aleksandrov I. V., Pasechnik M. A. *Vakuumnyj zahvatnyj korrektruyushchij modul* (Vacuum gripper with correcting device), Patent RU 2431561 C2. Ballot № 29, 2011 (in Russian).
9. Longo D., Muscato G. Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental consideration, *Proc. of 11th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2008)*, 08–10 September 2008, Coimbra, Portugal.
10. Luk B., Collie A., Billingsley J. Robug I. I.: An intelligent wall climbing robot, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1991, vol. 3, pp. 2342–2347.
11. Schmidt D., Berns K., Ohr J. Analysis of sliding suction cups for negative pressure adhesion of a robot climbing on concrete walls, *Adaptive Mobile Robotics. Proc. of the 15th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2012)*, 23–26 July 2012, Baltimore, USA, pp. 813–820.
12. Illingworth L., Reinfeld D. Vortex attractor for planar and non-planar surfaces, U. S. A. Patent 6.619.922, Sept. 16. 2003.
13. Gradeckij V. G. *Dinamicheskie processy v miniatyurnyh mobilnyh robotah s vakuumnym kontaktom k poverhnostyam peremeshcheniya* (The dynamics of miniature mobile robots with vacuum grippers), *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4, vol. 2, pp. 104–105 (in Russian).
14. Gradeckij V. G., Fomin L. F. *Dinamicheskie processy v sistemah sozdaniya vakuuma miniatyurnyh mobilnyh robotov* (The dynamics in vacuum grippers of miniature robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 9, pp. 10–14 (in Russian).
15. Camozzi official internet page, available at: www.camozzi.com
16. Tachkov A. A., Kalinichenko S. V., Malyhin A. Y. *Modelirovanie i ocenka ehffektivnosti sistemy uderzhanija malogabaritnogo avtonomnogo robota vertikalnogo peremeshcheniya s vakuumnymi zahvatami* (Simulation and evaluation of grasping efficiency for autonomous wall climbing robot with vacuum grippers), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 3, pp. 178–186 (in Russian).
17. Gradeckij V. G., Knyazkov M. M., Fomin L. F., Chashchuhin V. G. *Mekhanika miniatyurnyh robotov* (The mechanics of miniature robots), Moscow, Nauka, 2010, 271 p. (in Russian).
18. Gradeckij V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. *Upravlyaemoe dvizhenie mobilnyh robotov po proizvolno orientirovannym v prostranstve poverhnostyam* (Motion control of mobile robots moving over different surfaces), Moscow, Nauka, 2001, 359 p. (in Russian).
19. Apostolescu T. C., Udrea C., Duminica D., Iorasco C., Bogato L., Laurentiu A. C. Development of a climbing robot with vacuum attachment cups, *Proceedings of International Conference MECHITECH'11*, September 22–23, 2011, Bucharest, pp. 258–267.
20. Watanabe M., Tsukagoshi H. Snail inspired climbing robot using fluid adhesion to travel on rough concrete walls and ceilings, *Advanced in cooperative robotics. Proceedings of CLAWAR-2016*, 12–14 September 2016, London, UK, pp. 79–87.
21. Yamaguchi T., Go T., Yamada Y., Nakamura T. Development of negative pressure suction mechanism in omnidirectional wall-climbing robot for inspection of airplanes, *Advanced in cooperative robotics. Proceedings of CLAWAR — 2016*, 12–14 September 2016, London, UK, pp. 106–114.
22. Semiduberskij M. S. *Nasosy, kompressory, ventilyatory* (Pumps, compressors, fans), Moscow, Vysshaya shkola, 1966, 262 p. (in Russian).

УДК 621.01

DOI: 0.17587/mau.18.452-458

Ф. Н. Притыкин, д-р техн. наук., доц., pritykin@mail.ru, В. И. Небритов, магистрант, vnebritov@gmail.com, Омский государственный технический университет, Омск

Виртуальное управление движением руки андроидного робота с использованием базы знаний при синтезе перемещений с учетом положения запретных зон

Предложена организация структуры базы знаний, необходимой при осуществлении интеллектуального управления движением механизма руки андроидного робота с учетом различного расположения известных запретных зон. Предлагаемая структура базы знаний характеризует прошлый опыт синтеза движений руки по вектору скоростей с учетом известных препятствий, а также задает ее собственные свойства. Представлены вычислительные эксперименты, связанные с виртуальным управлением движением руки андроидного робота при наличии известных запретных зон на основе использования разработанной базы знаний.

Ключевые слова: виртуальное моделирование движений роботов, запретные зоны, синтез движений роботов, база знаний, тупиковые ситуации, механизм манипулятора

Введение

При создании алгоритма управления андроидным роботом, автономно функционирующим в организованной среде, требуется учитывать множество факторов. Данный алгоритм управления реализуется в виде множества правил и соответствующего механизма логического выбора. При этом в заданные интервалы времени на протяжении всего процесса управления должны происходить соответствующие оценки определенных параметров. Данные параметры определяют условия, которые указан-

ный алгоритм должен понимать. Обычно алгоритм управления андроидным роботом сталкивается с незапланированными событиями и неизвестными ситуациями, и желательно, чтобы он разумно вел себя в этих ситуациях. Поведение автономно функционирующего андроидного робота может быть улучшено, если система управления станет учитывать и использовать базу знаний или прошлый опыт синтеза перемещений с учетом положения заранее известных запретных зон.