

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-217-229>

## Автоматизированное проектирование системы управления роботизированной платформы с применением Adams и Matlab

В.А. Порхало<sup>1</sup>, В.Г. Рубанов<sup>1</sup>✉, А.Г. Бажанов<sup>1</sup>, О.В. Луценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова  
ул Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Целью данного исследования является оценка возможности разработки и моделирования оптимальной системы управления продольным перемещением робота по критерию максимального быстродействия путем применения системы виртуального моделирования MSC.Adams и пакета математического моделирования MATLAB.

**Методы.** Одним из подходов исследования является моделирование систем, при этом в качестве программного средства синтеза виртуальной физической модели робота используется система виртуального моделирования, а для моделирования системы управления применяется пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB и графическая среда имитационного моделирования Simulink. В качестве метода синтеза системы управления продольным перемещением применяется принцип максимум Понтрягина, а в качестве критерия оптимальности выступает максимальное быстродействие.

**Результаты.** Представлена структура системы управления роботизированной платформой, разработан оптимальный алгоритм управления и реализован в среде Simulink. Разработана структура системы управления физической моделью с передачей данных в Adams. Приведены и проанализированы кривые разгона и фазовый портрет системы управления моделью при продольном перемещении роботизированной платформы.

**Заключение.** Как видно из приведенных результатов моделирования, оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при разработке систем управления продольным перемещением мобильных роботов. Совместное моделирование функционирования виртуального прототипа и системы управления объектом в среде Matlab и Adams позволяет избежать изготовления натурной модели и дает возможность принять во внимание физические свойства объекта без создания аналитической модели.

**Ключевые слова:** моделирование; мобильный робот; позиционное управление; оптимальные системы; система автоматизированного проектирования.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

© В.А. Порхало, В.Г. Рубанов, А.Г. Бажанов, О.В. Луценко, 2020

**Для цитирования:** Автоматизированное проектирование системы управления роботизированной платформы с применением Adams и Matlab / В.А. Порхало, В.Г. Рубанов, А.Г. Бажанов, О.В. Луценко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 217-229. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-217-229>.

Поступила в редакцию 06.10.2020

Подписана в печать 29.10.2020

Опубликована 30.12.2020

## Computer-Aided Design of the Robotic Platform Control System Using Adams and Matlab

Vasily A. Porkhalo<sup>1</sup>, Vasily G. Rubanov<sup>1</sup> ✉, Alexander G. Bazhanov<sup>1</sup>,  
Oksana V. Lutcenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov  
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of this study is to assess the possibility of developing and simulating an optimal control system for the longitudinal movement of a robocars according to the criterion of maximum speed by using the MSC.Adams virtual modeling system and the MATLAB mathematical modeling package

**Methods.** One of the research approaches is system modeling, while a virtual modeling system is used as a software tool for synthesizing a virtual physical model of a robot, and a package of application programs for solving technical computing problems MATLAB and a graphical environment for simulation Simulink are used to model a control system. The Pontryagin maximum principle is used as a synthesis method for the longitudinal displacement control system, and the maximum speed is used as an optimality criterion.

**Results:** The structure of the control system for a robotic platform is presented; an optimal control algorithm is developed and implemented in the Simulink environment. The structure of the physical model management system with data transfer to Adams has been developed. The acceleration curves and the phase portrait of the model control system during the longitudinal movement of the robotic platform are presented and analyzed.

**Conclusion.** As can be seen from the above simulation results, the optimal positional control law, which implements the maximum principle, fulfills the task with the required quality indicators. In this regard, the proposed algorithm can be used in the development of control systems for the longitudinal movement of mobile robots. Joint modeling of the virtual prototype and the object control system in the Matlab and Adams environment avoids the production of a full-scale model and makes it possible to take into account the physical properties of the object without creating an analytical model.

**Keywords:** modeling; mobile robot; positional control; optimal systems; computer-aided design system.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the project State Assignment No. 2.1396.2017 / 4.6.

**For citation:** Rubanov V. G., Porkhalo V. A., Bazhanov A. G., Lutcenko O.V. Computer-Aided Design of the Robotic Platform Control System Using Adams and Matlab. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 217-229 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-217-229>.

Received 06.10.2020

Accepted 29.10.2020

Published 30.12.2020

## Введение

Классический подход к разработке технических объектов основывается на проектировании и последующем построении дорогостоящих и трудоемких физических прототипов [1]. При этом довольно часто ставится задача цифрового моделирования, а также виртуального прототипирования. Однако при построении аналитической математической модели принятые допущения зачастую ухудшают степень ее адекватности, что приводит к необходимости проведения экспериментов и физического моделирования динамики системы, при этом производится сравнение с результатами математического моделирования.

Натурное физическое моделирование применяется как в ходе проверки алгоритмов перемещения мобильных роботов, так и для получения экспериментальных данных о параметрах элементов для построения математических моделей. Такое физическое моделирование мобильных роботов приведено, например, в [2–4].

В связи с тем, что математическим моделям присущи недостатки, заключающиеся в меньшей адекватности модели из-за трудности осуществить учет всех особенностей физического объекта, а также тем, что натурное физическое моделирование требует построения физического объекта, что ведет к дополнительным материальным затра-

там, может быть использован гибридный подход к моделированию робототехнической платформы, который сочетает в себе достоинства физического и математического моделирования [5–6].

Одним из примеров современного программного обеспечения, которое помогает проводить эксперименты на качественных виртуальных моделях, учитывающих физические взаимодействия объекта с внешней средой, является Adams MSC Software. При симуляции перемещения объектов в Adams, преимуществом программного обеспечения является отсутствие детализации на статическом уровне конструктивного взаимодействия элементов, при этом достаточно реализовать кинематическую схему и указать свойства материалов, из которого состоят элементы модели мобильной платформы. Имеется возможность автоматически рассчитать моменты инерции, массу и другие параметры, которые используются при расчете модели. Также Adams позволяет экспортировать полученную модель в MATLAB. Такая модель, построенная в Adams, позволяет исключить расчет аналитической модели и учесть все внешние воздействия на объект.

При исследовании работ по разработке и оптимизации систем управления роботами можно видеть широкий круг подходов к решению проблем стабилизации курса, контроля движения, обхода препятствий [7] перемещения по траектории [8–10] и др., от примитив-

ных систем с сенсорами расстояния до устройств на базе машинного зрения, глубокого обучения [11] и распознавания объектов [12, 13]. В настоящей работе представлена физическая модель мобильного робота, разработанная в среде Adams, и система управления для нее, реализованная в MATLAB Simulink. Процесс моделирования динамики робокара состоит из следующих этапов: создание виртуальной модели робокара в Adams, реализация системы управления в MATLAB Simulink (структура системы управления и расчет регуляторов), подключение созданной системы управления к виртуальной модели, совместное моделирование.

### Специфика объекта исследования.

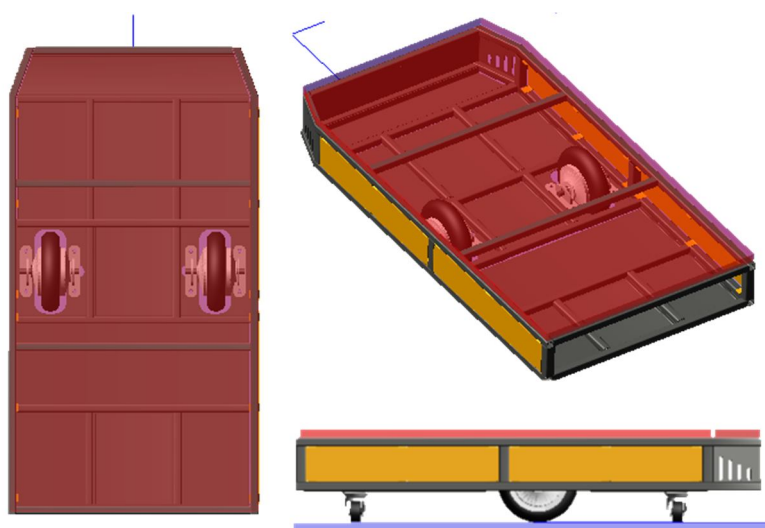
#### Материалы и методы

Робокар представляет собой платформу с ромбовидной схемой шасси (рис.1), где есть два ведущих колеса, расположенные на поперечной оси и

два вспомогательных колеса, расположенные на продольной оси. В робокаре используется привод с электродвигателем СЛ-621М, передача усилия от двигателей на колеса осуществляется с помощью планетарных редукторов с передаточным числом 4,7.

Рассмотрим структуру системы управления роботизированной платформы (рис. 2). В нее входят следующие элементы: оптимальный регулятор перемещения ОРП, электродвигатели ЭД, редукторы Р, исполнительные устройства ИУ (колеса), объект управления ОУ, который имеет два канала регулирования – по отклонению и продольному перемещению.

Задача управления продольным движением заключается в своевременном торможении платформы с целью предотвращения столкновений, а также точное позиционирование относительно причалов.



**Рис. 1.** Внешний вид модели роботизированной платформы в Adams

**Fig. 1.** Appearance of the robotic platform model in Adams

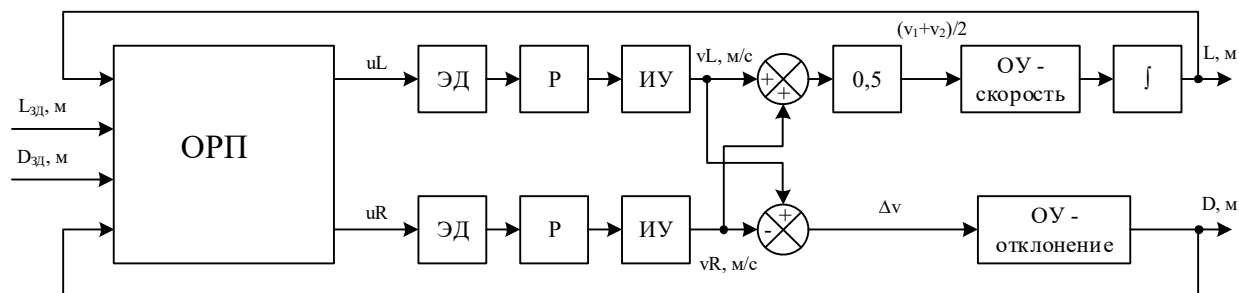


Рис. 2. Структура системы управления

Fig. 2. Structure of the control system

Эта задача решается путем применения принципа максимума Понтрягина [14]. При исследовании динамики продольного движения роботизированной транспортной тележки используется математическая модель ромбовидной схемы шасси, представленная в [15, 16]. Оптимальный алгоритм управления продольным движением робота синтезирован с использованием принципа максимума Понтрягина и имеет вид [17]:

$$u = -\text{sign}\left(x_1 - (\text{sign } x_2)(|x_2| + (1 - e^{|x_2|}))\right), \quad (1)$$

где  $x_1$  – разность между заданным перемещением и его текущим значением,  $x_2$  – скорость изменения этого отклонения.

Надо отметить, что при проведении комплексного моделирования необходимо также настроить контур управления по отклонению. Для этих целей достаточно синтезировать модель системы управления, в которой объект управления описывается передаточными функциями по каждому из каналов [18, 19]. Рассмотрим канал контроля поперечного отклонения тележки от заданной траектории. Так как управляющим воздействием в этом случае является разность скоростей вращения колес, а выходной координатой отклоне-

ние от трассы, то передаточная функция будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{V_T(1 + Ts)}{s^2},$$

где  $T = \frac{d}{V_T}$ ;  $d$  – расстояние от центра масс тележки до датчика отклонения центра масс от кинематической траектории;  $V_T$  – продольная скорость.

### Результаты и их обсуждение

Подставляя значения параметров (продольная скорость  $V_T = 1,5$  м/с,  $d = 0,49$  м,  $T = 0,327$  с), входящих в передаточную функцию, получим:

$$W(s) = \frac{1,5(1 + 0,327s)}{s^2}.$$

Передаточная функция двигателя, получаемая из модели двигателя постоянного тока, имеет вид:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_{\partial\theta}}{T_m s + 1} = \frac{2,438}{0,499s + 1},$$

где  $K_{\partial\theta} = \frac{1}{K_{\text{эм}}}$  – коэффициент передачи

двигателя;  $T_m = \frac{JR}{K_{\text{эм}}^2}$  – электромехани-

ческая постоянная времени.

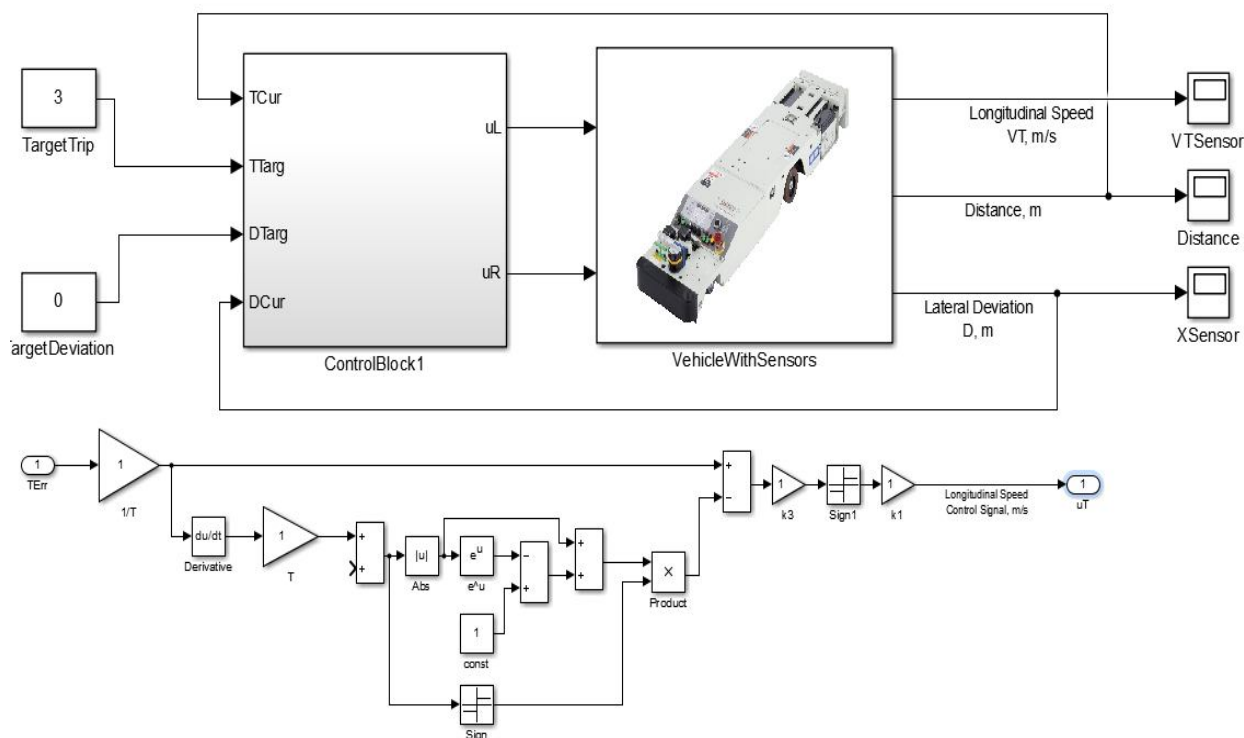
В работе [17] представлен вывод передаточной функции объекта управления (тележки) по скорости при продольном движении, которая для рассматриваемой модели ( $m = 63,7$  кг) имеет вид:

$$W(s) = \frac{K_n}{Ts + 1} = \frac{3,897}{0,036s + 1}.$$

В случае, если требуется передаточная функция этого канала по перемещению, необходимо добавить последовательно включенное интегрирующее звено.

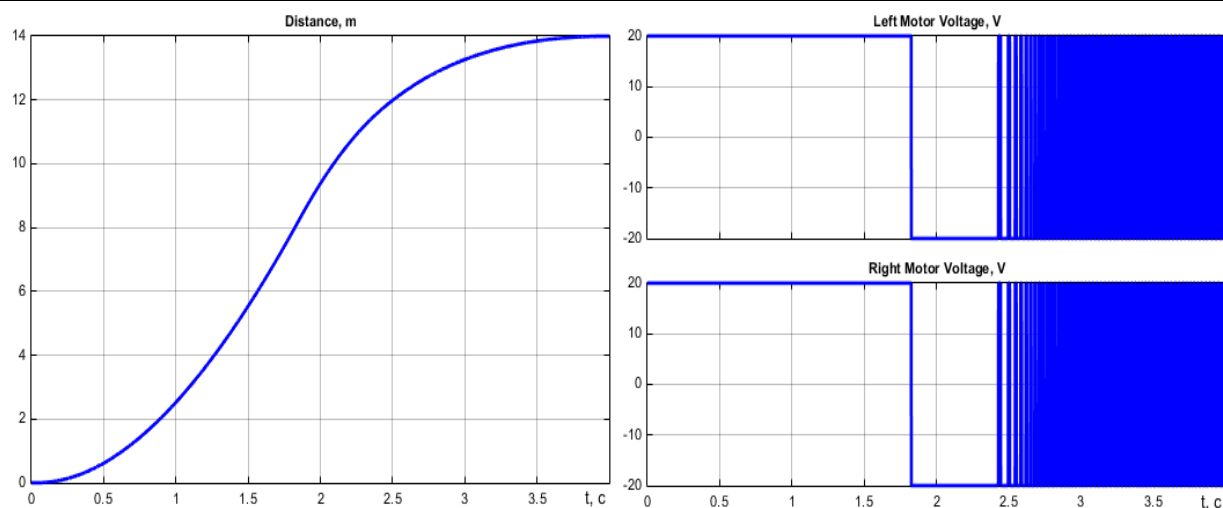
Располагая передаточными функциями элементов системы управления, можно составить модель в Simulink, соответствующую схеме, представленной

на рис. 2, с помощью которой, сняв необходимые характеристики, настроить регуляторы по каждому из каналов управления, воспользовавшись одной из методик выбора оптимальных параметров. Введя настроенный регулятор отклонения и оптимальный позиционный регулятор перемещения, реализующий функцию регулирования (1) в структуру системы управления виртуальной моделью (рис. 3) и осуществив совместную симуляцию, получим следующие переходные процессы продольного перемещения робокара и управляющего сигнала, подаваемого на исполнительные механизмы (рис. 4).



**Рис. 3.** Структура системы управления физической моделью в MATLAB Simulink с передачей данных в Adsms: общий вид и структура оптимального регулятора перемещения

**Fig. 3.** The structure of the control system for a physical model in MATLAB Simulink with data transfer to Adsms: general view and structure of the optimal motion controller



**Рис. 4.** Результат моделирования работы системы управления с оптимальным позиционным регулятором по перемещению

**Fig. 4.** The result of modeling the operation of a control system with an optimal positional controller for displacement

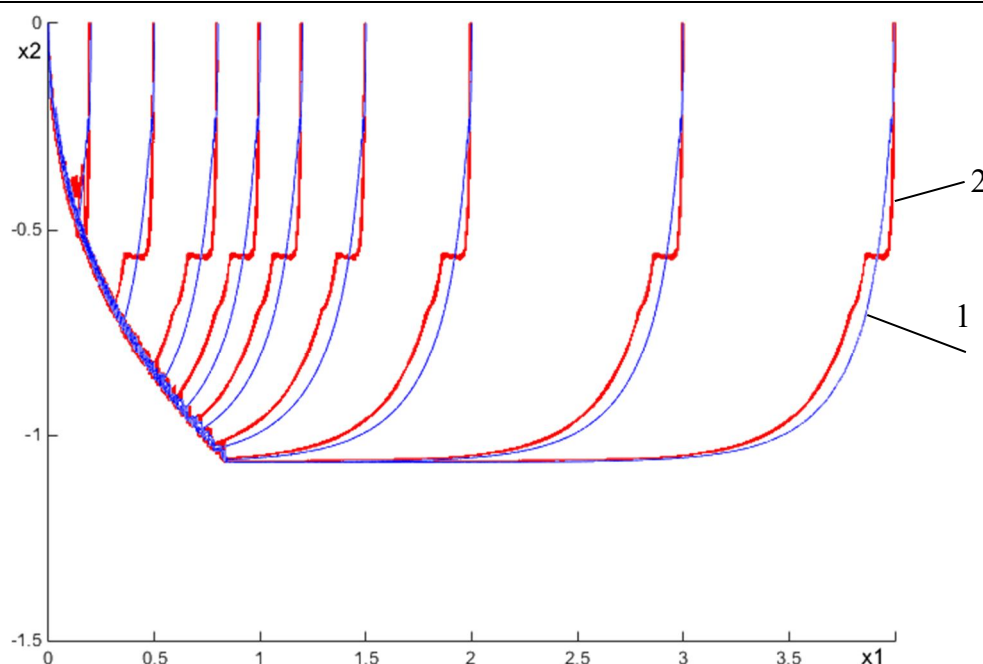
Как видно из приведенных результатов моделирования (см. рис.4), оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при технической реализации системы управления продольным перемещением мобильных роботов. При этом потребуются программно-аппаратная реализация алгоритмов управления, что может быть сделано на базе современных технических средств [20]. Описанный оптимальный регулятор продольного перемещения может быть также использован в целях предотвращения столкновений при движении нескольких роботизированных платформ.

На рис. 5 представлены фазовые портреты модели роботизированной платформы, где по осям откладывается разность между заданным перемещением и его текущим значением ( $x_1$ ) и ско-

рость изменения этого отклонения ( $x_2$ ). На фазовом портрете наблюдается так называемый скользящий режим работы системы [14], возникающий в нелинейной системе из-за наличия релейных элементов. Ступенька на начальном этапе фазовой траектории объясняется эффектом проскальзывания ведущих колес робота по поверхности. Статический коэффициент сцепления задан 0,6, динамический 0,55 (кривые с учетом проскальзывания обозначены цифрой 2, красный график). В связи с этим наблюдаются колебания в скользящем режиме.

Для фазового портрета при идеальных условиях (кривые 1, синий график), то есть когда проскальзывание отсутствует, наблюдается более плавный набор скорости, а также меньшая амплитуда колебаний в скользящем режиме. Однако в реальных условиях поведение системы будет более соответствовать кривым 2.





**Рис. 5.** Фазовый портрет системы управления при продольном перемещении:  
**кривые 1** – при отсутствии проскальзывания; **кривые 2** – в реальных условиях,  
 $\mu$  (стат) = 0.6,  $\mu$  (дин) = 0.55

**Fig. 5.** Phase portrait of the control system during longitudinal movement: **curves 1** – in the absence of slippage; **curves 2** – in real conditions,  $\mu$  (stat) = 0.6,  $\mu$  (dyn) = 0.55

## Выводы

Оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при разработке систем управления продольным перемещением мобильных роботов. Совместное моделирование системы управления в среде Matlab и Adams является удобным ин-

струментом изучения динамики сложного объекта, поскольку отпадает необходимость в изготовлении физической модели, а также появляется возможность принять во внимание физические эффекты без разработки сложной аналитической модели. Такой способ моделирования динамических объектов можно рекомендовать для проектирования систем управления в научных, учебных и промышленных целях.

## Список литературы

1. Viger I. Features of virtual prototyping technology at all stages of the product lifecycle //CAD/CAM/CAE Observer. 2016. № 8 (108). P. 48–53.



2. AGV Trajectory Control Based on Laser Sensor Navigation / T. L. Bui , Doan P.T., S.S. Park, H. K. Kim, S. B. Kim // International Journal of Science and Engineering. 2013. Vol. 4(1): 16-20. P. 39–43.

3. Ivanjko E., Petrinić T., Petrović I. Modelling of Mobile Robot Dynamics // EUROSIM 2010, 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Prague, Czech Republic, 06-10.09.2010. Prague, 2010. Vol. 2. 9 p. URL: [http://www.google.ru/url?sa=t&rect=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F228561343\\_Modeling\\_of\\_Mobile\\_Robot\\_Dynamics%2Ffile%2F504635256b78692e72.pdf&ei=V7lbU7HuAuGfyQPI8YG4DA&usg=AFQjCNHkX15eujeaVwSrM8F1ueQByAgHJQ&sig2=mx3Ba0ecN3b-6WsJqVJWbQ&bvm=bv.65397613,d.bGE](http://www.google.ru/url?sa=t&rect=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F228561343_Modeling_of_Mobile_Robot_Dynamics%2Ffile%2F504635256b78692e72.pdf&ei=V7lbU7HuAuGfyQPI8YG4DA&usg=AFQjCNHkX15eujeaVwSrM8F1ueQByAgHJQ&sig2=mx3Ba0ecN3b-6WsJqVJWbQ&bvm=bv.65397613,d.bGE).

4. Dynamic Models of an AGV Based on Experimental Results / J. I. Suárez , B.M. Vinagre, F. Gutierrez, J. E. Naranjo, Y. Q. Chen // 5th Symposium Intelligent autonomous vehicles. Oxford, 2005. Vol. 1. P. 275-280.

5. Рыбин И. А., Рубанов В. Г., Апаршев С. А. Гибридная модель динамики мобильного робота // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. Волгоград; Харьков, 2012. Т. 10. С. 6–8.

6. Шеховцов Ю. А., Рыбин И. А., Рубанов В. Г. Гибридное моделирование транспортно-складских процессов при использовании роботов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. В. С. Балакирева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. Т. 5. С. 238–248.

7. Герасимов В.Н., Михайлов Б.Б. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск "Робототехнические системы". 2012. № 6. С.83 – 92.

8. Рыбин И.А., Рубанов В.Г., Дуюн Т.А. Способ исследования движения мобильного робота на стационарной установке удаленного доступа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 11. 2014. С.14-21.

9. Зенкевич С.Л., Назарова А.В. Система управления мобильного колесного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2006. № 3. С.31 – 51.

10. Laumond J.-P., ed. Robot motion planning and control (Lectures Notes in Control and Information Sciences, vol. 229). Berlin, Springer, 1998. 343 p.

11. Human-friendly interaction for learning and cooperation / S. Kristensen, S. Horstmann, J. Klandt, F. Lohner, A. Stopp // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea, 2001. P.2590 - 2595.

12. Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2013. Vol. 71 (1). P. 85 – 108.
13. Бобырь М.В., Титов В.С. Мягкий нейронечеткий алгоритм управления мобильным роботом // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №10 (171). С.144 – 157.
14. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиздат, 1969. 384 с.
15. Sethi S.P., Thompson G.L. Optimal control theory: applications to management science and economics. Berlin, Springer, 2005. 521 p.
16. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // сб. трудов. науч. конф. ВСПУ-2014 / Инст. пробл. управ. им. В.А. Трапезникова РАН. Москва, 2014. С. 67–78.
17. Порхало В.А., Рубанов В.Г., Костин С.В. Повышение живучести роботизированных транспортных средств на автоматизированном складе // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. А.А. Большакова*. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2017. Т.4. 140 с.
18. Рубанов В.Г., Луакурва Дж.П., Порхало В.А. Моделирование динамики движения мобильного робота в среде Matlab // *Известия ТулГУ*. 2006. № 1. С. 126–134.
19. Bushuev D.A., Kiseleva T. Y., Rubanov V.G. Virtual prototype for co-simulation of hub-motor dynamics with brushless DC motor and elements of fault-tolerant control // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems MEACS 2018)*. 560. 012103. 2019: 7 p.
20. Порхало В.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З. Информационные представления адаптивного трехпозиционного алгоритма для его аппаратных и программных реализаций // *Научные ведомости БГУ*. 2011. № 1(96). Вып. 17/1. С. 161–168.

## References

1. Viger I. Features of virtual prototyping technology at all stages of the product lifecycle // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2016, no. 8 (108), pp. 48–53.
2. Bui, T. L., Doan P.T., Park S.S., Kim H. K., Kim S. B. AGV Trajectory Control Based on Laser Sensor Navigation. *International Journal of Science and Engineering*, 2013, vol. 4(1), 16-20, pp. 39–43.
3. Ivanjko E., Petrinić T., Petrović I. Modelling of Mobile Robot Dynamics. *EUROSIM 2010, 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Prague, Czech Republic, 06-10.09.2010. Prague, 2010, vol. 2, 9 p. Available at: [http://www.google.ru/url?sa=t & rc=1](http://www.google.ru/url?sa=t&rc=1)

& q= & esrc=s & source=web & cd=1 & cad=rja & uact=8 & ved=0CCcQFjAA & url=http %3A %2F %2F www.researchgate.net %2F publication%2F 228561343\_Modelling\_of\_Mobile\_Robot\_Dynamics %2F file%2F 504635256b78692e72.pdf & ei=V7lbU7HuAuGfyQPI8YG4DA & usg=AFQjCNHkX15eujeaVwSrM8F1ueQByAgHJQ & sig2=mx3Ba0ecN3b-6WsJqVJWbQ & bvm=bv.65397613,d.bGE.

4. Suárez J. I., Vinagre B.M., Gutierrez F., Naranjo J. E., Chen Y. Q. Dynamic Models of an AGV Based on Experimental Results. *5th Symposium Intelligent autonomous vehicles*. Oxford, 2005, vol. 1, pp. 275-280.

5. Rybin I. A., Rubanov V. G., Aparshev S. A. [Hybrid model of the dynamics of a mobile robot]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT 25 sb. trudov XXV Mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT-25. coll. of proceedings of the XXV Intern. scientific Conf.]. Vol. 10. Section 12. Kharkov; 2012, pp. 6–8 (In Russ.).

6. Shekhovtsov Y. A., Rybin I. A., Rubanov V. G. [Hybrid modeling of transport and storage processes using robokars]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT 23* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT-23: coll. of proceedings of the XXIII International scientific conf.]. Saratov, 2010, vol. 5, section 5, pp. 238–248 (In Russ.).

7. Gerasimov V.N., Mikhailov B.B. Reshenie zadachi upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota pri nalichii dinamicheskikh prepyatstviy [Solving the problem of controlling the movement of a mobile robot in the presence of dynamic obstacles]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Priborostroenie. Spetsvypusk "Robototekhnicheskie sistemy" = Vestnik BMSTU. Instrumentation. Special issue "Robotic Systems"*, 2012, no. 6, pp. 83 – 92 (In Russ.).

8. Rybin I. A., Rubanov V. G., Duun T. A. Sposob issledovaniya dvizheniya mobil'nogo robota na statsionarnoi ustanovke udalennogo dostupa [Method for studying the movement of a mobile robot on a stationary remote access installation]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2014, no.11, pp. 14–21 (In Russ.).

9. Zenkevich S. L., Nazarova A.V. Sistema upravleniya mobil'nogo kolesnogo robota [Mobile wheeled robot control system]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Priporostroenie" = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. "Instrument making"*, 2006, no. 3, pp. 31 – 51 (In Russ.).

10. Laumond J.-P., ed. Robot motion planning and control (Lectures Notes in Control and Information Sciences, vol. 229). Berlin, Springer, 1998, 343 p.

11. Kristensen S., Horstmann S., Klandt J., Lohner F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea, 2001, pp.2590 - 2595.
12. Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, vol. 71 (1), pp. 85 – 108.
13. Bobyr M. V., Titov V. S. Myagkii neironechetkii algoritm upravleniya mobil'nyim robotom [Soft neuro-fuzzy control algorithm for mobile robot]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya YUFU. Technical Science*, 2015, no. 10 (171), pp. 144-157 (In Russ.).
14. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Fizmatizdat Publ., 1969. pp. 338.
15. Sethi S.P., Thompson G.L. *Optimal control theory: applications to management science and economics*. Berlin, Springer, 2005. 521 p. (In Russ.).
16. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. [Mobile robots: problems of control and optimization of movements]. *Sb. trudov. nauch. konf. VSPU-2014* [Sat works. scientific conf. VSPU-2014]. 2014, pp. 67–78 (In Russ.).
17. Porkhalo V.A., Rubanov V.G., Kostin S.V. [Improving the survivability of robotic vehicles in an automated warehouse]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh. Sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical methods in engineering and technology. Proceedings of the international. scientific Conf.]. Saint-Petersburg, 2017, Vol. 4 pp. 100–104 (In Russ.).
18. Rubanov V. G., J. Lyakurwa.P., Porkhalo V. A. Modelirovanie dinamiki dvizheniya mobil'nogo robota v srede Matlab [Modeling of dynamics of movement of a mobile robot in the Matlab environment]. *Izvestiya TulGU = Izvestiya TulGU*, 2006, no. 1, pp. 126–134 (In Russ.).
19. Bushuev D.A., Kiseleva T. Y., Rubanov V.G. Virtual prototype for co-simulation of hub-motor dynamics with brushless DC motor and elements of fault-tolerant control. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems MEACS 2018)*, 2019, 7 p.
20. Porkhalo V. A., Bazhanov A. G., Magergut V. Z. Informatsionnye predstavleniya adaptivnogo trekhpozitsionnogo algoritma dlya ego apparatnykh i programmnykh realizatsii [Information representations of an adaptive three-position algorithm for its hardware and software implementations]. *Nauchnye vedomosti BGU = Scientific statements of Belgorod State University*, 2011, no1(96), is.17/1, pp. 161–168 (In Russ.).

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Порхало Василий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: porhalo@mail.ru

**Рубанов Василий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

**Бажанов Александр Геральдович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: all\_exe@mail.ru

**Луценко Оксана Витальевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: lutsenko.ov@bstu.ru

**Vasily A. Porkhalo**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Engineering Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: porhalo@mail.ru

**Vasily G. Rubanov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Engineering Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

**Alexander G. Bazhanov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Engineering Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: all\_exe@mail.ru

**Oksana V. Lutsenko**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the of Standardization and Quality Management Department, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: lutsenko.ov@bstu.ru