

Литература

1. Lauwers T.B., Kantor G.A., Hollis R.L. A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2006. – 2884 p.
2. Nagarajan U., Mampetta A., Kantor G., Hollis R. State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2009. – P. 3161–3166.
3. Колюбин С.А., Пыркин А.А. Управление нетривиальными маятниковыми системами в условиях параметрической и функциональной неопределенностей // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 69. – С. 34–39.
4. Anderson B.D.O., Moore J.B. Optimal control: linear quadratic methods. – Prentice-Hall, 1989. – 394 p.
5. Ha Y.-S., Yuta S. Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum // Proc. IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – 1994. – P. 1875–1882.
6. Linear-Quadratic-Regulator (LQR) design – MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/control/ref/lqr.html>, св. Яз. англ. (дата обращения 18.03.2011).
7. Быстров С.В., Григорьев В.В., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А. Экспоненциальная устойчивость непрерывных динамических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 73. – С. 44–47.

<i>Боргуль Александр Сергеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, borgulalexandr@gmail.com
<i>Громов Владислав Сергеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, object253@yandex.ru
<i>Зименко Константин Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kostyazimenko@gmail.com
<i>Маклашевич Сергей Юрьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, s.maklashevich@gmail.com

УДК 681.513.1, 681.513.3

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ДВУХКОЛЕСНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ «МОТОБОТ»

А.А. Бобцов, А.С. Боргуль, К.А. Зименко, А.А. Пыркин

Рассмотрена задача управления мобильным роботом типа мотоцикл, построенном на базе Lego Mindstorms NXT. Для макета робота разработан регулятор, обеспечивающий устойчивое вертикальное положение при перемещении по горизонтальной плоскости с возможностью дистанционного управления траекторией движения.

Ключевые слова: мобильные роботы, автономный мотоцикл, неустойчивые системы, управление по выходу.

Введение

Роботы сегодня входят в нашу жизнь в различных областях. Они летают в космос, исследуют другие планеты, помогают в военных целях – разминируют бомбы и разведывают обстановку с воздуха. В промышленности многие отрасли уже немислимы без роботов: они собирают автомобили, помогают находить новые лекарства. Многие устройства, принимающие решения на основе полученных от сенсоров данных, тоже можно считать роботами, например, лифты, стиральные машины, системы антиблокировочного торможения, помогающие избежать аварий.

Одну из наиболее важных проблем, которую можно решить с помощью робототехники – это вопрос, связанный с транспортом. В условиях современной загруженности дорог (пробки в городе и, наоборот, бездорожье в сельской местности) особую ценность представляет одноколесный транспорт, об-

ладающий маневренностью, малыми габаритами и пониженным энергопотреблением. Так, в частности, с помощью мотоцикла можно проехать в пробке, найти тропинку на проселочной дороге и решить многие другие задачи, связанные с современным темпом жизни. С развитием робототехники, теории и систем автоматического управления стало возможным решение задачи автономного движения мотоцикла.

Задача стабилизации одноколейного двухколесного транспорта в вертикальном положении была поставлена еще в середине прошлого века и относится к классическим задачам механики и теории управления. Известны работы [1, 2], в которых уделено внимание задаче управления «роботом-велосипедистом», включая математические модели и возможные алгоритмы управления. Достижение устойчивости на одноколейном транспорте является гораздо более сложной проблемой, чем на любой другой платформе, поэтому никто не преуспел в создании автономных мотоциклов, несмотря на все их преимущества.

С развитием высокоточного приборостроения и робототехники поменялся подход к созданию аппаратов данного типа. Самой известной является разработка фирмы DARPA GrandChallenge [3].



Рис. 1. Автономно-управляемый мотоцикл DARPA GrandChallenge

В этой разработке стабилизация осуществляется за счет скорости поворота руля. Также модель оснащена GPS навигацией для определения карты местности. Система технического зрения по трем каналам вместе с GPS позволяют создать подробную карту местности. Преимущества двухколесной системы перед трех-, четырех-, шестиколесными конструкциями – в большей управляемости и уменьшении жесткости привязки к земной поверхности. Следует отметить, что для одноместного мотоцикла требуется постоянная настройка, которая чрезвычайно трудно достигается (в частности, в данной разработке более 140 тысяч строк программного кода для успешной стабилизации).

Устойчивость мотоцикла зависит от баланса сил, которыми управляет водитель. При длительном или напряженном темпе движения проявляются такие факторы, как усталость, нервное напряжение – причина большинства дорожно-транспортных происшествий. Другой проблемой при удержании равновесия мотоцикла является зависимость гироскопического стабилизирующего момента от линейной скорости движения. При низких скоростях исчезает управляемость в системе.

В работе описывается макет автономного мобильного робота «Мотобот», являющегося моделью двухколесного мотоцикла. Как и в [4], для построения макета используется конструктор Lego Mindstorms NXT. Анализируется математическая модель движения двухколесного одноколейного робота на плоскости, на основе которой синтезируются алгоритмы автоматического управления. Задача может быть решена путем управления рулевым колесом и скоростью ведущего колеса. Решены локальные задачи стабилизации вертикального положения равновесия, движения вдоль прямой с заданной скоростью, а также реализовано дистанционное управление траекторией движения с помощью джойстика и радиоканала связи.

Математическая модель робота «Мотобот»

Математическая модель мотоцикла является нелинейной и включает несколько важных параметров, таких как масса мотоцикла, коэффициент трения, расстояние между проекциями колес, моменты инерции составных частей относительно центра масс и др. Математическая модель состоит из четырех основных частей: рамы, двух колес и рулевой вилки. Приемлемая модель имеет 7 степеней свободы, из них 3 – степени свободы угловых скоростей. Модель может быть соответственно параметризованной с помощью следующих переменных: угол крена вдоль поперечной оси φ ; угол поворота с помощью рулевого колеса δ , изменение уровня вращения заднего колеса θ .

За основу была взята модель сбалансированного одноколейного транспорта с симметрией масс (рис. 2, а) [5]. Рассмотрим декартову систему координат с центром в точке O и осями x , y и z (рис. 2, б). Заднее колесо R , соединенное с рамой, при наличии водителя имеет центр масс в точке B .

Центр масс B размещен в следующей области: $x_B = 0$, $y_B = 0$, $z_B < 0$. Момент инерции рамы относительно центра масс представлен матрицей моментов инерции размерности (3×3) , где все массы симметричны относительно проекции xz . Центр масс передней части рамы с вилкой и рулем H находится в следующей области $x_H = 0$, $y_H = 0$, $z_H < 0$. Матрицы моментов инерции передней и задней сборок равны

$$\mathbf{I}_B = \begin{bmatrix} I_{Bxx} & 0 & I_{Bxz} \\ 0 & I_{Byy} & 0 \\ I_{Bxz} & 0 & I_{Bzz} \end{bmatrix}, \mathbf{I}_H = \begin{bmatrix} I_{Hxx} & 0 & I_{Hxz} \\ 0 & I_{Hyy} & 0 \\ I_{Hxz} & 0 & I_{Hzz} \end{bmatrix}.$$

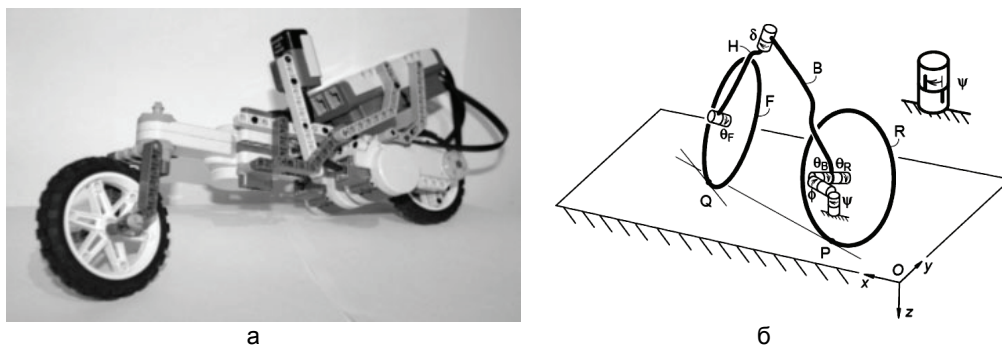


Рис. 2. Прототип мобильного робота «Мотобот» (а) и схематическое изображение углов положения составных частей (б)

Представим линеаризованные уравнения движения:

$$P = \sum F_i \cdot \Delta v_i = T_\phi \Delta \dot{\phi} + T_\delta \Delta \dot{\delta} + T_{\theta_R} \Delta \dot{\theta}_R,$$

где T_ϕ , T_δ , T_{θ_R} – обобщенные силы каждой линейной комбинации компонентов различных приложенных сил F .

Принятие полной линеаризации и движения без завала, по прямой, может быть достигнуто при любой скорости, удовлетворяющей условию $v = -\dot{\theta}_R r_R$. Боковая симметрия системы, совмещенная с линейностью уравнений, позволяет получить зависимость между прямолинейным движением и углами падения и поворота. Исходя из этого, линеаризованное уравнение движения для первой степени свободы (движения вперед) просто получить, исследуя систему по осям x, z :

$$[r_R^2 m_T + I_{Ryy} + (r_R / r_F)^2 I_{Fyy}] \ddot{\theta}_R = T_{\theta_R}.$$

Линеаризованные уравнения для двух других степеней свободы, угла падения и поворота рулевого колеса – это пара совмещенных дифференциальных уравнений второго порядка. Уравнение в канонической форме, где первое уравнение отражает крен, а второе поворот руля, имеет вид $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f}$.

Для модели мотоцикла запишем его в форме $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + v\mathbf{C}_1\dot{\mathbf{q}} + [g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2]\mathbf{q} = \mathbf{f}$, где изменяемые во времени переменные $\mathbf{q} = [\phi, \delta]^T$ и $\mathbf{f} = [T_\phi, T_\delta]^T$; \mathbf{M} – симметричная матрица масс, которая отображает кинетическую энергию мотоцикла. Матрица затухания $\mathbf{C} = v\mathbf{C}_1$ линейной скорости v и охватывает косо-симметрические гироскопические моменты, возникающие из-за уровней крена мотоцикла и рулевого управления. \mathbf{C}_1 также содержит инерциальные реакции, возникающие во время рулевого управления. Матрица жесткости \mathbf{K} состоит из двух частей: независимой от скорости симметричной части $g\mathbf{K}_0$, пропорциональной гравитационному ускорению, которая может быть использована при расчете изменения потенциальной энергии, и части $v^2\mathbf{K}_2$, которая пропорциональна квадрату скорости и зависит от гироскопического и центробежного эффектов. Таким образом, имеем характеристическое уравнение:

$$\det(\mathbf{M}\lambda^2 + v\mathbf{C}_1\lambda + g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2) = 0. \tag{1}$$

Далее следует рассматривать решения [4] при различных скоростях. На низких и высоких скоростях асимптотическая устойчивость не достижима, в силу ряда факторов. На начальных этапах рассматривается диапазон средних скоростей, где решается задача асимптотической устойчивости.

В общем виде модель движения выглядит следующим образом:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}(\mathbf{q}, t)\mathbf{u}, \quad \dot{\mathbf{u}} = [\mathbf{M}(\mathbf{q}, t)]^{-1}\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \mathbf{u}, t),$$

где \mathbf{q} – обобщенная координата; u – обобщенная скорость; \mathbf{S} – кинематическая матрица, которая отображает отношение уровней обобщенных координат к обобщенным скоростям; \mathbf{M} – система матриц масс; \mathbf{Q} содержит все силы и зависимости от скорости инерции.

Нахождение параметров линеаризованной модели движения робота

Будем использовать следующие индексы: R – для заднего колеса; B – для задней части рамы совместно с мотоциклистом; H – для передней части с рулем; F – для переднего колеса; T – для системы в целом; A – для сборки передней части рамы с рулем.

Найдем общую массу и расположение центра масс (относительно точки контакта заднего колеса с землей P):

$$m_T = m_R + m_B + m_H + m_F, \quad x_T = (x_B m_B + x_H m_H + w m_F) / m_T, \\ z_T = (-r_R m_R + z_B m_B + z_H m_H - r_F m_F) / m_T.$$

Для вывода момента инерции всего мотоцикла вдоль оси z используем соответствующие моменты масс и значения инерций по отношению к контактной точке P вдоль общих осей, с учетом зависимости осесимметричных моментов инерции переднего и заднего колес:

$$I_{Tzz} = I_{Rzz} + I_{Bzz} + I_{Hzz} + I_{Fzz} + m_B x_B^2 + m_H x_H^2 + m_F w^2.$$

Таким же способом описывается передняя сборка A . Рассмотрим вектор $\lambda = (\sin \lambda, 0, \cos \lambda)^T$, направленный вниз вдоль рулевой оси, где λ – угол на плоскости xz . Центр масс передней сборки расположен выше руля, перпендикулярно $u_A = (x_A - w - c) \cos \lambda - z_A \sin \lambda$. Для передней сборки требуются три специальные величины инерции: момент инерции относительно оси руля и значения моментов инерции относительно смещенных и косых осей, взятых около точки, где они пересекаются. Из этих соотношений берется момент около одной оси, возникающий из-за углового ускорения около других.

Отношение механического трейла (расстояние между продолжением рулевой вилки и проекцией передней оси на поверхность) к базе колес $\mu = (c/w) \cos \lambda$.

Угловые моменты заднего и переднего колес вдоль оси y , вычисленные с помощью линейной скорости, вместе с их суммой из гиростатических коэффициентов, равны

$$S_R = I_{Ryy} / r_R, S_F = I_{Fyy} / r_F, S_T = S_R + S_F.$$

Сформируем параметры линеаризованных уравнений движения.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{\varphi\varphi} & M_{\varphi\delta} \\ M_{\delta\varphi} & M_{\delta\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} K_{0\varphi\varphi} & K_{0\varphi\delta} \\ K_{0\delta\varphi} & K_{0\delta\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} K_{2\varphi\varphi} & K_{2\varphi\delta} \\ K_{2\delta\varphi} & K_{2\delta\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} C_{1\varphi\varphi} & C_{1\varphi\delta} \\ C_{1\delta\varphi} & C_{1\delta\delta} \end{bmatrix},$$

где $M_{\varphi\varphi} = I_{Txx}$, $M_{\varphi\delta} = I_{Axx} + \mu I_{Txz}$, $M_{\delta\varphi} = M_{\varphi\delta}$, $M_{\delta\delta} = I_{A\lambda\lambda} + 2\mu I_{A\lambda z} + \mu^2 I_{Tzz}$ – элементы симметричной матрицы масс \mathbf{M} ; $K_{0\varphi\varphi} = m_T z_T$, $K_{0\varphi\delta} = -S_A$, $K_{0\delta\varphi} = K_{0\varphi\delta}$, $K_{0\delta\delta} = -S_A \sin \lambda$ – гравитационные коэффициенты жесткости (умноженные на g); $K_{2\varphi\varphi} = 0$, $K_{2\delta\varphi} = 0$, $K_{2\varphi\delta} = ((S_T - m_T z_T) / w) \cos \lambda$, $K_{2\delta\delta} = ((S_A + S_F \sin \lambda) / w) \cos \lambda$ – скоростные коэффициенты жесткости (умноженные на v^2); $C_{1\varphi\varphi} = 0$, $C_{1\varphi\delta} = \mu S_T + S_F \cos \lambda + (I_{Txz} / w) \cos \lambda - \mu m_T z_T$, $C_{1\delta\delta} = (I_{A\lambda z} / w) \cos \lambda + \mu (S_A + (I_{Txz} / w) \cos \lambda)$, $C_{1\delta\varphi} = -(\mu S_T + S_F \cos \lambda)$ – коэффициенты матрицы «затухания» \mathbf{C} .

Расчет параметров регулятора

Запишем уравнения баланса угловых моментов. Баланс углового момента крена относительно продольной оси:

$$-m_T \ddot{y}_P z_T + I_{Txx} \ddot{\varphi} + I_{Txz} \ddot{\psi} + I_{A\lambda x} \ddot{\delta} + \dot{\psi} v S_T + \dot{\delta} v S_F \cos \lambda = T_{B\varphi} - g m_T z_T \varphi + g S_A \delta.$$

Баланс углового момента рыскания относительно точки P :

$$m_T \ddot{y}_P x_T + I_{Tzz} \ddot{\varphi} + I_{Txz} \ddot{\psi} + I_{A\lambda z} \ddot{\delta} - \dot{\varphi} v S_T - \dot{\delta} v S_F \sin \lambda = w F_{Fy}.$$

Баланс углового момента руля для передней сборки:

$$m_A \ddot{y}_P u_A + I_{A\lambda z} \ddot{\psi} + I_{A\lambda\lambda} \ddot{\delta} + v S_F (-\dot{\varphi} \cos \lambda + \dot{\psi} \sin \lambda) = T_{H\delta} - c F_{Fy} \cos \lambda + g (\varphi + \delta \sin \lambda) S_A.$$

Используя выражение, характеризующее изменение угла крена относительно изменения угла рыскания рамы, получим итоговое выражение баланса мотоцикла:

$$\ddot{y}_P = ((v^2 \delta + v c \dot{\delta}) / w) \cos \lambda.$$

Уравнения задания положения мотоцикла относительно задней контактной точки:

$$\dot{x}_P = v \cos \psi, \quad \dot{y}_P = v \sin \psi.$$

Для модели вход-состояние-выход, где $\mathbf{x} = [\dot{\phi}, \dot{\delta}, \phi, \delta]^T$ – вектор состояния, найдем закон управления $u = T_{\delta}$. Расчет регулятора для случая адаптивной системы будем проводить с помощью алгоритма «полоска». Для неадаптивной системы воспользуемся линейно-квадратичным регулятором с критерием качества $J = \int_0^{\infty} (x^T Q_u x + u^T R_u u) dt$, где Q_u и R_u – диагональные матрицы штрафов по состоянию и управлению. Выберем $Q_u = \text{diag}\{0, 0, 1, 0\}$, так как итоговая цель балансирования мотоцикла, удержание вертикального положения, может быть достигнута минимизацией угла крена. Для контроля усилий возьмем $R_u = 1$.

Алгоритм управления рулевым колесом по измерению угла крена выберем в виде пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, коэффициенты которого подберем методом Циглера–Никольса: $k_p = 8,23$ – для пропорционального, $k_i = 1,48$ – для интегрального и $k_d = 2,76$ – для дифференциального составляющих сигнала управления.

Заключение

На базе макета мобильного робота «Мотобот» были проведены экспериментальные исследования системы управления. На рис. 3 приведены временные диаграммы реальных процессов в системе во время эксперимента.

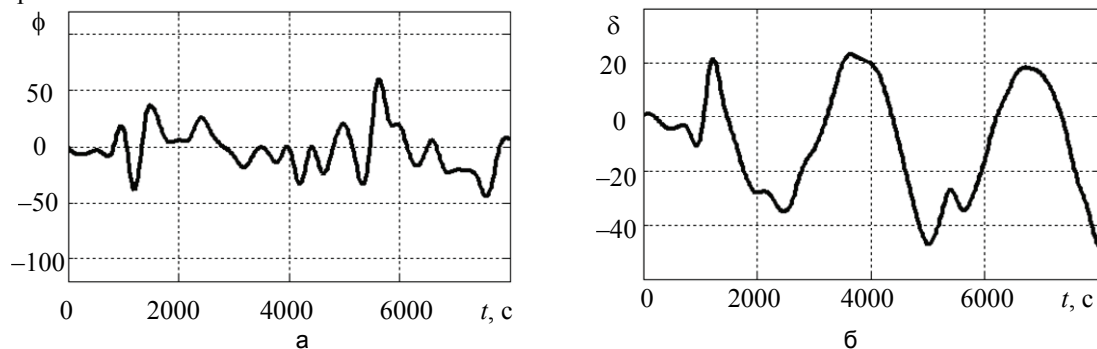


Рис. 3. Временные диаграммы процессов в роботе «Мотобот»: угол крена мотоцикла ϕ [град/с] (а); угол поворота рулевого колеса δ [град] (б)

Как видно из рис. 3 синтезированная система обладает достаточным запасом устойчивости не только для постоянного поддержания мотоцикла в вертикальном положении, но и для возможности управления направлением и скоростью движения.

В отличие от ближайшего аналога [5], в этой работе были сделаны ключевые изменения в конструкции, позволившие обеспечить стабильное передвижение робота по горизонтальной плоскости в течение длительного периода времени. Была уменьшена длина рамы и трейла, изменена конструкция руля. Расположение гироскопа ближе к центру сделало конструкцию реалистичнее. В отличие от [5], вместо пропорционального регулятора был использован ПИД-регулятор, что позволило компенсировать статическую ошибку слежения и демпфировать колебания. Было реализовано дистанционное управление с джойстика для управления траекторией движения «Мотобота». На рис. 4 представлены кадры, полученные во время проведения эксперимента.



Рис. 4. Движение мобильного робота «Мотобот» с коррекцией траектории

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П498 от 08.08.2010 г.; проекты 2011-1.2.1-402-014/057 и 2011-1.2.2-215-009/023).

Литература

1. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 448 с.
2. Селиванов А.А., Никитин Д.А. Адаптивное управление роботом-велосипедистом // XII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб, 2010. – 16 с.
3. Архив агентства по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://archive.darpa.mil/>, свободный. Яз. англ.
4. Бобцов А.А., Капитанюк Ю.А., Капитонов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А., Чепинский С.А., Шаветов С.В. Технология LEGO MINDSTORMS NXT в обучении студентов основам адаптивного управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1. – С. 103–108.
5. Meijaard J.P., Papadopoulos J.M., Ruina A., Schwab A.L. Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review // Proceedings of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences. – 2007. – V. 463. – № 2084. – P. 1955–1982.

- Бобцов Алексей Алексеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru
- Боргуль Александр Сергеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, borgulalexandr@gmail.com
- Зименко Константин Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kostyazimenko@gmail.com
- Пыркин Антон Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com