

*С.П. Круглов<sup>1</sup>, С.А. Романьков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИД-УПРАВЛЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГРУЗОВОЙ ДВУХКОЛЕСНОЙ БАЛАНСИРУЮЩЕЙ ТЕЛЕЖКОЙ**

**Аннотация:** В статье предлагается вариант автоматизации перевозки багажа пассажиров и грузов внутри транспортных узлов. Особенно это актуально для малоподвижных пассажиров. Описываются общие характеристики универсальной грузовой балансирующей тележки и основные задачи, на нее возлагаемые. Приводится описание математической модели предлагаемой тележки. На имитационной компьютерной модели производится анализ системы управления этой тележкой с ПИД-регулированием процесса балансирования исходно неустойчивого объекта управления. При этом рассматриваются различные типовые параметры перевозимых грузов и внешних возмущений. Результаты исследования указывают на недостатки этого метода управления для рассматриваемой задачи. Также для этой задачи управления нельзя применить другие известные методы, основанные на априорной информации о параметрах управляемого объекта. В качестве вывода предлагается строить адаптивную систему управления.

**Ключевые слова:** обслуживание пассажиров, ПИД-регулятор, двухколесная балансирующая тележка, внешнее возмущение, устойчивость.

*S.P. Kruglov<sup>1</sup>, S.A. Roman`kov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

## **ANALYSIS OF USE OF PID CONTROL OF UNIVERSAL CARGO TWO-WHEELED BALANCING TROLLEY**

**Abstract.** The article proposes the option of automation of transportation of baggage of passengers and cargo inside transport nodes. This is especially true for slow-moving passengers. General characteristics of universal load balancing trolley and main tasks assigned to it are described. A description of the mathematical model of the proposed trolley is given. Simulation computer model is used to analyze control system of this trolley with PID control of balancing process of initially unstable control object. Different typical parameters of transported goods and external disturbances are considered. The results of the study indicate the shortcomings of this control method for the task under consideration. You cannot also use other known methods for this control task based on a priori object parameter information. As an inference, it is proposed to build an adaptive control system.

**Keywords:** passenger service, PID regulator, two-wheeled balancing trolley, external disturbance, stability.

**Введение.** Существует известная тенденция по повышению качества обслуживания пассажиров в транспортных узлах таких как, железнодорожные вокзалы, аэропорты, автовокзалы и др. Особенно это касается маломобильных пассажиров, для которых создаются адаптированные пассажирские инфраструктуры и вокзальные комплексы (см., например, [1,2]).

Одним из способов решения указанной задачи является внедрение автоматизации перевозки багажа пассажиров и других грузов внутри транспортных узлов. В настоящее время для перевозки вещей пассажиров широко используются ручные тележки (рис.1,а). Но они являются громоздкими, неманевренными и неавтоматизированными. Кроме того, частой проблемой использования таких тележек является их отсутствие в нужном для пассажира месте.

Для решения этой проблемы предлагается разработать универсальную грузовую двухколесную балансирующую тележку (рис.1б) для перевозки багажа пассажиров и других грузов в транспортных узлах, которая будет обладать свойствами компактности, малыми

габаритами (в разы меньше упомянутой тележки), удобства использования и автономного передвижения.

Предполагается, что эта тележка будет решать следующие основные задачи:

– перевозка грузов с широким диапазоном характеристик (включая пустую тележку) с обеспечением автоматической балансировки и перемещению по поверхности с разным наклоном и действием внешних возмущений;

– перевозка грузов в режиме ручного управления (посредством пульта дистанционного управления);

– автономная перевозка грузов с назначенной конечной точкой маршрута, что предполагает автономное построение маршрута между начальной и конечной точками маршрута, решение задач текущей навигации, а также объезд препятствий при следовании по маршруту; сюда также относиться перемещение пустой тележки по вызову пассажира в назначенное место и др.



Рис. 1. Грузовые тележки

В целом эта универсальная тележка будет представлять собой мехатронную систему, включающую набор датчиков, систему управления приводными двигателями, один или несколько цифровых вычислителей для обработки информации, решения задач навигации и формирования управления, два приводных двигателя и блок аккумуляторных батарей. В силу того, что тележка в исходном состоянии является неустойчивой, вопросы ее балансировки и устойчивого перемещения в условиях большой вариации параметров груза, внешних возмущений возлагается на систему автоматического управления тяговыми двигателями тележки.

Настоящая работа посвящена этому вопросу. Наиболее часто используемым методом управления техническими системами является широко известное ПИД-регулирование [3]. Задачей этой статьи является проверка возможности его использования для выполнения задач балансировки при движении.

**Описание математической модели.** Описание математической модели подобной механической системы было проведено ранее в ряде работ, например [4-6], однако там рассматривались модели в упрощенной постановке и при движении по горизонтальной поверхности.

Ограничимся рассмотрением только прямолинейного (плоского) движения тележки. Поэтому в качестве исследуемого объекта будем понимать двухзвенную механическую систему, изображенную на рис.2.



$\varphi_{\Gamma}$ , присоединенный момент –  $M_{\text{вн}}$ . Для описания динамики этой двухзвенной механической системы воспользуемся известным уравнением Лагранжа – Эйлера 2го рода [7], которое здесь принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\gamma}} - \frac{\partial L}{\partial \gamma} = M_{\text{дв}} - F_{\text{тр}} R_{\text{к}}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{\Gamma}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{\Gamma}} = M_{\text{вн}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L = K - \Pi$  – функция Лагранжа;  $K$  – полная кинетическая энергия механической системы;  $\Pi$  – полная потенциальная энергия механической системы.

Кинетическая энергия складывается из поступательных скоростей центров тяжести звеньев и угловых скоростей звеньев вокруг их центров тяжести. Потенциальная – из вертикального перемещения центров масс обоих звеньев:

$$\begin{cases} K = \frac{1}{2} (m_{\text{к}} V^2 + m_{\Gamma} V_{\Gamma}^2 + m_{\text{к}} r_{\text{к}}^2 \dot{\gamma}^2 + m_{\Gamma} r_{\Gamma}^2 \dot{\varphi}_{\Gamma}^2); \\ \Pi = m_{\text{к}} g \gamma R_{\text{к}} \sin \theta + m_{\Gamma} g (\gamma R_{\text{к}} \sin \theta + l_{\Gamma} \cos \varphi_{\Gamma}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $V = \dot{\gamma} R_{\text{к}}$ .

Далее определим значение  $V_{\Gamma}$ :  $V_{\Gamma}^2 = \dot{x}_{\Gamma}^2 + \dot{y}_{\Gamma}^2$ ;  $x_{\Gamma} = x + l_{\Gamma} \sin \varphi_{\Gamma}$ ;  $y_{\Gamma} = y + l_{\Gamma} \cos \varphi_{\Gamma}$ ;  $x = \gamma R_{\text{к}} \cos \theta$ ;  $y = \gamma R_{\text{к}} \sin \theta$ , отсюда:

$$V_{\Gamma}^2 = R_{\text{к}}^2 \dot{\gamma}^2 + l_{\Gamma}^2 \dot{\varphi}_{\Gamma}^2 + 2R_{\text{к}} l_{\Gamma} \cos(\theta + \varphi_{\Gamma}) \cdot \dot{\gamma} \dot{\varphi}_{\Gamma}. \quad (3)$$

На основе найденных соотношений (2) и (3) запишем значение функции Лагранжа:

$$L = \frac{1}{2} [m_{\text{к}} (R_{\text{к}}^2 + r_{\text{к}}^2) + m_{\Gamma} R_{\text{к}}^2] \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} m_{\Gamma} (l_{\Gamma}^2 + r_{\Gamma}^2) \dot{\varphi}_{\Gamma}^2 + m_{\Gamma} R_{\text{к}} l_{\Gamma} \cos(\theta + \varphi) \cdot \dot{\gamma} \dot{\varphi}_{\Gamma} - (m_{\text{к}} + m_{\Gamma}) g R_{\text{к}} \sin \theta \cdot \gamma - m_{\Gamma} g l_{\Gamma} \cos \varphi_{\Gamma}.$$

Подставляя полученное в (1), найдем дифференциальные уравнения, описывающие динамику изменения присоединенных переменных тележки в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\gamma} \\ \ddot{\varphi}_{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

где  $a_{11} \triangleq m_{\text{к}} (R_{\text{к}}^2 + r_{\text{к}}^2) + m_{\Gamma} R_{\text{к}}^2$ ;  $a_{12} = a_{21} \triangleq m_{\Gamma} R_{\text{к}} l_{\Gamma} \cos(\theta + \varphi_{\Gamma})$ ;  $a_{12} \triangleq m_{\Gamma} (l_{\Gamma}^2 + r_{\Gamma}^2)$ ;

$b_1 \triangleq M_{\text{дв}} - F_{\text{тр}} R_{\text{к}} + m_{\Gamma} R_{\text{к}} l_{\Gamma} \sin(\theta + \varphi_{\Gamma}) \cdot \dot{\gamma}^2 - (m_{\text{к}} + m_{\Gamma}) g R_{\text{к}} \sin \theta$ ;  $b_2 \triangleq M_{\text{вн}} + m_{\Gamma} g l_{\Gamma} \sin \varphi_{\Gamma}$ .

Разрешая это уравнение относительно  $\ddot{\gamma}$  и  $\ddot{\varphi}_{\Gamma}$ , получим:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\gamma} \\ \ddot{\varphi}_\Gamma \end{bmatrix} = \chi^{-1} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\chi \triangleq a_{11}a_{22} - a_{12}^2 = [m_\kappa(R_\kappa^2 + r_\kappa^2) + m_\Gamma R_\kappa^2]m_\Gamma(l_\Gamma^2 + r_\Gamma^2) - m_\Gamma^2 R_\kappa^2 l_\Gamma^2 \cos^2(\theta + \varphi_\Gamma)$ .

Отсюда следует описание динамики относительно старших производных присоединенных переменных (без учета их начальных состояний):

$$\begin{cases} \ddot{\gamma} = \chi^{-1} \begin{Bmatrix} m_\Gamma(l_\Gamma^2 + r_\Gamma^2) \left[ M_{\text{дв}} - F_{\text{тр}}R_\kappa + m_\Gamma R_\kappa l_\Gamma \sin(\theta + \varphi_\Gamma) \cdot \dot{\varphi}_\Gamma^2 - \right] \\ - (m_\kappa + m_\Gamma)gR_\kappa \sin\theta \\ - m_\Gamma R_\kappa l_\Gamma \cos(\theta + \varphi_\Gamma) [M_{\text{вн}} + m_\Gamma g l_\Gamma \sin\varphi_\Gamma] \end{Bmatrix}; \\ \ddot{\varphi}_\Gamma = \chi^{-1} \begin{Bmatrix} -m_\Gamma R_\kappa l_\Gamma \cos(\theta + \varphi_\Gamma) \left[ M_{\text{дв}} - F_{\text{тр}}R_\kappa + m_\Gamma R_\kappa l_\Gamma \sin(\theta + \varphi_\Gamma) \cdot \dot{\varphi}_\Gamma^2 - \right] \\ - (m_\kappa + m_\Gamma)gR_\kappa \sin\theta \\ + [m_\kappa(R_\kappa^2 + r_\kappa^2) + m_\Gamma R_\kappa^2] [M_{\text{вн}} + m_\Gamma g l_\Gamma \sin\varphi_\Gamma] \end{Bmatrix}. \end{cases} \quad (5)$$

По этой модели наиболее просто анализировать построение законов управления.

**Анализ ПИД-управления тележкой.** Была составлена имитационная модель балансирующей тележки по полученным уравнениям динамики (4), (5) в программной среде MatLab/Simulink (рис.3).

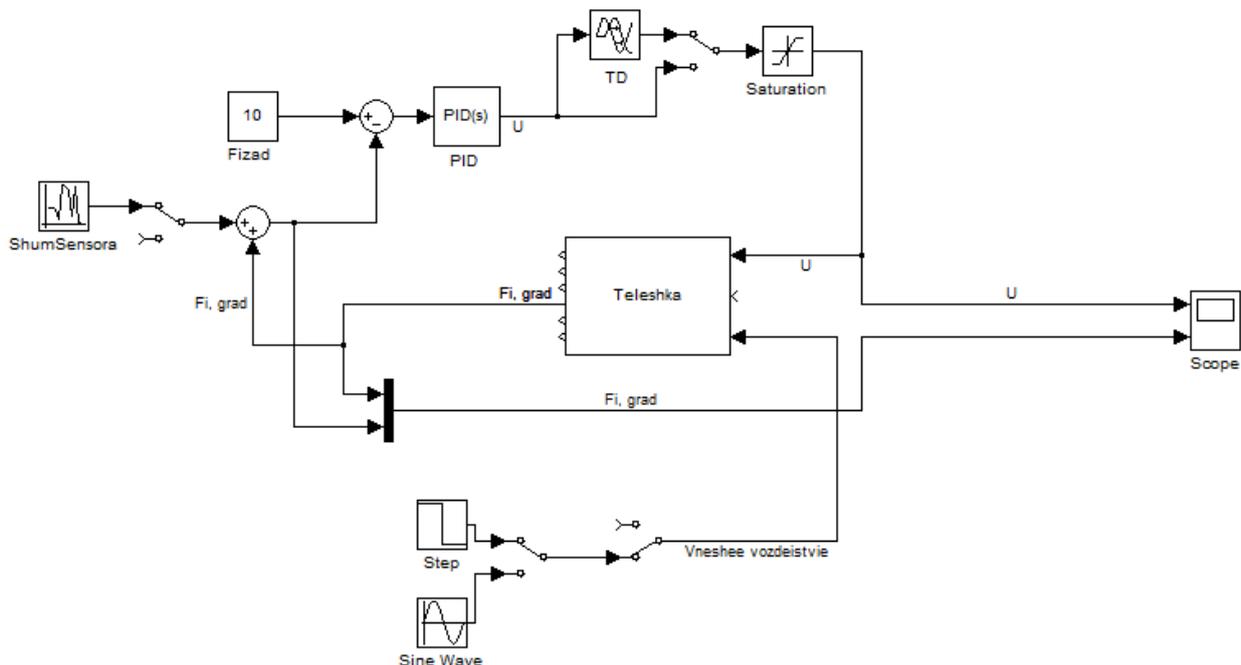


Рис. 3. Модель управления с ПИД – регулятором:

На рисунке обозначено: «Teleshka» – подсистема, моделирующая динамику двухколесной балансирующей тележки; «PID» – ПИД-регулятор в замкнутой системе управления; «TD» – блок транспортной задержки (0.01 с); «Saturation» – блок ограничения управляющего воздействия с пределами от 100 Н до 100 Н; «U» – момент приводного двигателя ( $M_{\text{дв}}$ , управляющее воздействие); «Fi» – сигнал  $\varphi_\Gamma$ ; «Fizad» – заданное значение

$\varphi_{\Gamma}$ ; «ShumSensora» – шум при измерении угла наклона тележки (предполагался центрированным гауссовским процессом со среднеквадратическим отклонением 0.2 град); «Step» и «Sine Wave» – блоки, формирующие внешнее воздействие в виде сигнала  $M_{\text{вн}}$ .

Параметры тележки:  $m_k = 10$  кг;  $R_k = 0.1$  м;  $r_k = 0.07$  м. Моделирование проводилось с временным шагом 0.01 с. Все исследования сопровождались присутствием внешнего возмущения ( $M_{\text{вн}}$ ) в виде ступенчатого сигнала в момент времени 5с с размахом 30 Нм. Параметр  $\Delta\varphi = 0$ .

Коэффициенты ПИД-регулятора были найдены путём автоматической настройки, для обеспечения наилучшего качества переходного процесса при параметрах груза:  $m_{\Gamma} = 50$  кг;  $l_{\Gamma} = 0.6$  м;  $J \triangleq m_{\Gamma} r_{\Gamma}^2 = 8.3$  кг м<sup>2</sup> (средний вариант груза,  $\theta = 0$ ). Заданное значение наклона тележки 10 град. Найденные коэффициенты ПИД-регулятора (в пропорциональной, интегральной и дифференциальной ветви соответственно): 2.7, 7.3, 0.9. Частота среза низкочастотного фильтра в дифференциальной ветви  $30$  с<sup>-1</sup>. График переходных процессов для этого исследования представлен на рис.4.

Далее исследовалась эта система управления при других параметрах груза (моделировались условия априорной неопределенности). Все варианты используемых параметров представлены в таблице – это типовые виды грузов. Так же исследования проводились при различном угле наклона опорной поверхности  $\theta$  от 0 до 30 град. Качество системы управления оценивалось по времени регулирования – интервалу времени, за который тележка достигает заданного угла наклона с точностью не хуже  $\pm 5\%$  от заданного.

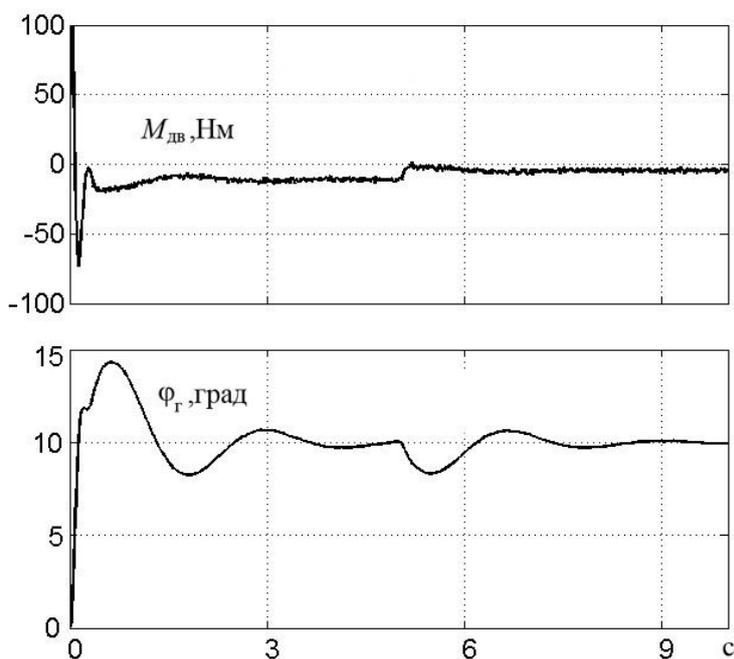
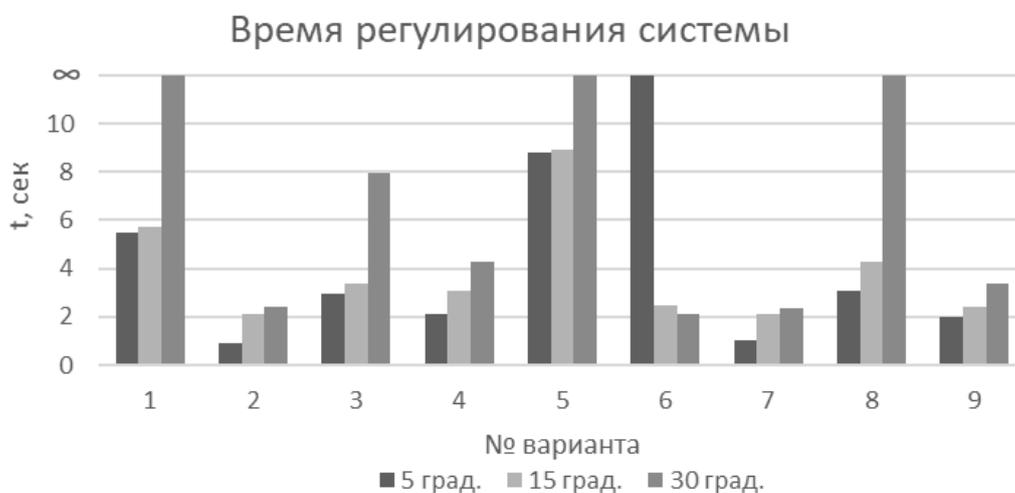


Рис.4. Графики переходных процессов при управлении с ПИД-регуляторами

Характеристики системы управления, в зависимости от изменений параметров груза по таблице представлены на рис.5. Разными оттенками обозначены различные углы наклона поверхности. Бесконечное время регулирования означает неустойчивое поведения объекта.

Таблица Варианты перевозимого груза

№	Наименование	Масса груза ( $m_{\Gamma}$ ), кг	Высота центра масс груза ( $R_{\kappa} + l_{\Gamma}$ ), м	Центральный момент инерции груза, $J$ , кг м <sup>2</sup>
1	Человек (1.8м, 80 кг)	80	1	23
2	Легкий габаритный груз (1x1x1 м)	10	0.6	1.7
3	Тяжелый габаритный груз (1x1x1 м)	50	0.6	8.3
4	Блин от штанги 50 кг	50	0.11	0.8
5	Блин от штанги 100 кг	100	0.11	1.6
6	Вода в канистре (0.4x0.4x0.4м)	10	0.3	0.21
7	Канцелярия, книги (0.4x0.4x1м)	12	0.6	1.2
8	3 чемодана (0.6x0.9x0.9м)	60	0.55	6
9	3 доски (0.2x2x0.07м)	9	0.13	3



**Рис.5.** Характеристики системы управления в зависимости от изменений параметров груза

**Заключение.** Результаты моделирования указывают на неэффективность системы с ПИД-регулированием, на невозможность настройки регулятора на все варианты перевозимых грузов (их многообразие на практике может быть еще большим). Система управления нуждается в применении адаптивных методов управления, что позволит ей быстро подстраиваться к априорно неизвестным и изменяющимся параметрам объекта управления и внешним неконтролируемым возмущениям, обеспечивая требуемое качество управления.

Известны другие методы управления механических систем типа обратный маятник, например, путем построения оптимального управления [4], методом распределения корней системы управления [8,9]. Однако эти методы требуют априорной информации о параметрах объекта управления, что в нашем случае неприемлемо. Известен метод управления на основе нейросетевого регулятора [10], однако он требует предварительной настройки системы управления под конкретный переносимый груз и др. Указанное еще раз подчёркивает актуальность создания системы управления универсальной грузовой двухколесной балансирующей тележки на адаптивном уровне.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иловайский Н.Д., Киселёв А.Н. Сервис на транспорте. – М.: Транспорт, 2003, -584с.
2. Программа повышения качества транспортного обслуживания пассажиров в 2017-2019 годах. Распоряжение от 24 марта 2017 года N 543р. ОАО "Российские железные дороги".

3. K.J.Astrom, T.Hagglund. *Advanced PID Control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. 460 p.
4. Формальский А.М. *Управление движением неустойчивых объектов*. – М.: Физматлит. 2012. – 232 с.
5. Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Разработка системы автоматической стабилизации в вертикальном положении двухколесной платформы // *Автоматика и программная инженерия*. 2014. №2. С. 15 – 21.
6. Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота // *Автоматика и программная инженерия*. 2015. №2. С. 16 – 34.
7. Павленко Ю.Г. *Лекции по теоретической механике*. – М.: Физматлит, 2002. – 392 с.
8. Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г., Рот Г. Получение желаемого качества переходных процессов системы стабилизации двухколесного балансирующего робота на основе численной оптимизации // *Автоматика и программная инженерия*. 2018. №2. С. 33 – 44.
9. Шадрин Г.К., Порубов Д.А., Шадрин М.Г. Синтез алгоритма управления движением двухколесного робота методом компенсации динамики объекта и возмущений // *Автоматика и программная инженерия*. 2017. №4. С. 10 – 17.
10. Глушенко А.И., Петров В.А., Ласточкин К.А. Разработка нейросетевого регулятора для управления балансирующим роботом // *Интеллектуальные системы, управление и мехатроника*. 2018. С. 72 – 76.

#### REFERENCES

1. Plovajskij N.D., Kiselyov A.N. *Servis na transporte [Service on transport]*. Moscow. Transport, 2003,-584 p.
2. Programma povu`sheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya passazhirov v 2017-2019 godax. Rasporyazhenie ot 24 marta 2017 goda N 543r [Program to improve the quality of passenger transport services in 2017-2019. Order dated March 24, 2017 No. 543p.]. OAO "Rossijskie zhelezny`e dorogi".
3. K.J.Astrom, T.Hagglund *Advanced PID Control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. 460 p.
4. Formal`skij A.M. *Upravlenie dvizheniem neustojchivy`x ob`ektov [Controlling the Movement of Unstable Objects]*. Moscow. FIZMATLIT. 2012. 232 p.
5. Ivojlov A.Yu., Zhmud` V.A., Trubin V.G. *Razrabotka sistemy` avtomaticheskoy stabilizacii v vertikal`nom polozhenii dvuxkolesnoj platformy` [Development of automatic stabilization system in vertical position of two-wheeled platform]*. *Avtomatika i programmnyaya inzheneriya*. 2014.No2. P. 15-21.
6. Fedorov D.S., Ivojlov A.Yu., Zhmud` V.A., Trubin V.G. *Razrabotka sistemy` stabilizacii ugla otkloneniya balansiruyushhego robota [Development of the balancing robot deflection angle stabilization system]*. *Avtomatika i programmnyaya inzheneriya*. 2015. No2. P. 16-34.
7. Pavlenko Yu.G. *Lekcii po teoreticheskoy mexanike [Lectures on theoretical mechanics]*. Moscow.: Fizmalit, 2002. 392 p.
8. Ivojlov A.Yu., Zhmud` V.A., Trubin V.G., Rot G. *Poluchenie zhelaemogo kachestva perexodny`x processov sistemy` stabilizacii dvuxkolesnogo balansiruyushhego robota na osnove chislennoj optimizacii [Obtaining the Desired Transition Quality of a Two-Wheeled Balancing Robot Stabilization System Based on Numerical Optimization]*. *Avtomatika i programmnyaya inzheneriya*. 2018.No2. P. 33-44.
9. Shadrin G.K., Porubov D.A., Shadrin M.G. *Sintez algoritma upravleniya dvizheniem dvuxkolesnogo robota metodom kompensacii dinamiki ob`ekta i vozmushhenij [Synthesis of two-wheeled robot motion control algorithm by method of object dynamics and disturbances compensation]*. *Avtomatika i programmnyaya inzheneriya*. 2017. No4. P. 10-17.

10. Glushhenko A.I., Petrov V.A., Lastochkin K.A. Razrabotka nejrosetevogo regul'yatora dlya upravleniya balansiruyushhim robotom [Development of a neural network regulator to control the balancing robot]. *Intellektual'ny'e sistemy, upravlenie i mexatronika*. 2018. P. 72-76.

#### **Информация об авторах**

*Круглов Сергей Петрович* – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru)

*Романьков Станислав Алексеевич* – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [romankovsa@yandex.ru](mailto:romankovsa@yandex.ru)

#### **Authors**

*Kruglov Sergey Petrovich* – doctor of technical sciences, professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru)

*Roman`kov Stanislav Alekseevich* – graduate student of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [romankovsa@yandex.ru](mailto:romankovsa@yandex.ru)

#### **Для цитирования**

Круглов С.П., Романьков С.А. Анализ использования ПИД-управления универсальной грузовой двухколесной балансирующей тележкой // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2020. – №1(6). – С. 28-36. DOI: 10.26731/2658-3704.2020.1(6).28-36 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/16-2020>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 20.01.2020)

#### **For citation**

Kruglov S.P., Roman`kov S.A. Analysis of use of PID control of universal cargo two-wheeled balancing trolley // *Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2020. No. 1(6). P. 28-36. DOI: 10.26731/2658-3704.2020.1(6).28-36 [Accessed 20/01/2020]