

**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 АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГРУЗОВОЙ ДВУХКОЛЕСНОЙ БАЛАНСИРУЮЩЕЙ ТЕЛЕЖКОЙ**

***Аннотация.** В статье обсуждается вариант автоматизации перевозки багажа пассажиров и грузов внутри транспортных узлов в виде универсальной грузовой двухколесной балансирующей транспортной тележки. Особенно это актуально для малоподвижных пассажиров. Описываются общие характеристики этой тележки и основные задачи, на нее возлагаемые. Приводится описание математической модели предлагаемой тележки для указанных задач. В силу разнообразия перевозимых грузов, действия внешних возмущений, предлагается строить закон управления балансировкой рассматриваемой тележки на адаптивном уровне на основе идентификационного алгоритма адаптации с неявной эталонной моделью и использованием «упрощенных» условий адаптируемости с инверсной моделью объекта управления. На имитационной компьютерной модели производится анализ эффективности системы управления при различных типовых параметрах перевозимых грузов и внешних возмущений. Результаты исследования указывают на достоинства предлагаемого метода управления в сравнении с другими известными подходами.*

***Ключевые слова:** обслуживание пассажиров, адаптивное управление, 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 THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF THE UNIVERSAL CARGO TWO-WHEEL BALANCING TROLLEY**

***Annotation.** The article discusses the option of automating of transportation of baggage of passengers and cargo inside transport nodes in the form of a universal cargo two-wheeled balancing transport trolley. This is especially true for low-mobility passengers. The general characteristics of this trolley and the main tasks assigned to it are described. The mathematical model of the proposed trolley for the indicated tasks is described. Because of the variety of cargo transported, actions of external disturbances, it is proposed to build the law of balancing control of the trolley in question at the adaptive level based on the adaptation identification algorithm with an implicit reference model and the use of “simplified” conditions adaptability using the inverse model of the control object. On a simulation computer model, an analysis of the effectiveness of the control system is performed for various typical parameters of the transported cargo and external disturbances. The results of the study indicate the advantages of the proposed control method in comparison with other known approaches.*

***Keywords:** passenger service, adaptive control, 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 относится 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 [3-7]. Исследования показывают [8-10], что данный метод не справляется с поставленной задачей и требуется внедрение адаптивной системы управления. Задачей этой статьи является анализ использования системы адаптивного управления для выполнения задач балансировки при движении.

**Описание математической модели.** Описание математической модели подобной механической системы было проведено ранее в ряде работ, например [11, 12], однако там рассматривались модели в упрощенной постановке и при движении по горизонтальной поверхности. Более подробное описание математической модели для поставленной задачи

для прямолинейного движения приведено в работе [4]. Здесь приведем лишь полученный результат. Условное изображение тележки, представляющей двухзвенную механическую систему, приведено на рис.2.

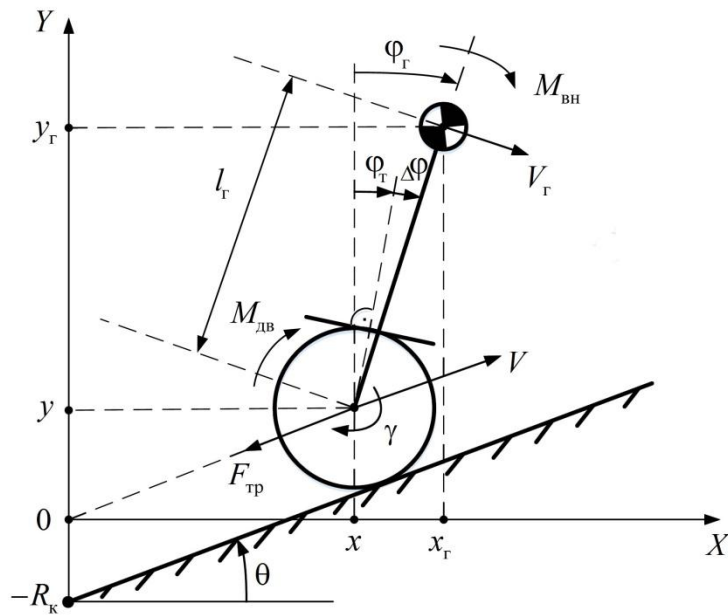


Рис. 2. Математическая модель тележки

Первое звено – колесо (колесная пара) с центром масс на оси его вращения, второе – линия-рычаг, соответствующий платформе тележки с грузом с центром масс, расположенным на удалении  $l_r$  от оси вращения колеса, последний условно будем называть центром масс груза. Также на рисунке обозначено:

$\varphi_g$  – угол наклона линии, связывающей центр масс груза и ось вращения колеса, от местной вертикали;  $\varphi_g = \varphi_T + \Delta\varphi$ ;  $\varphi_T$  – угол наклона тележки от местной вертикали;  $\Delta\varphi$  – дополнительный угол отклонения центра масс груза из-за неточности расположения груза над осью колес при  $\varphi_T = 0$ ;  $\Delta\varphi = \arctg(\Delta x_{гр}/l_{гр})$ ,  $\Delta x_{гр}$  – указанное смещение центра масс груза;

$\gamma$  – угол поворота колеса (колесной пары);

$\theta$  – угол наклона опорной поверхности относительно горизонта;

$m_k$  – масса колесной пары;

$m_T$  – масса груза;

$R_k$  – радиус колеса;

$r_k$  – радиус инерции колесной пары;

$r_T$  – радиус инерции груза;

$x, y$  – текущие координаты тележки в указанной системе координат  $OXY$ ;

$x_g, y_g$  – текущие координаты центра тяжести груза;

$V$  – скорость тележки относительно поверхности;

$V_g$  – скорость центра тяжести груза;

$M_{дв}$  – момент приводного двигателя колесной пары;

$F_{тр}$  – сила трения движения тележки;

$M_{\text{вн}}$  – внешний момент, действующий на тележку, совместно с ненулевыми  $\Delta\varphi$  и  $\theta$  представляет собой внешнее неконтролируемое возмущение.

Присоединенной переменной первого звена является угол  $\gamma$ , а присоединенный момент – соответственно  $(M_{\text{дв}} - F_{\text{тр}}R_{\text{к}})$ . Присоединенной переменной второго звена является угол  $\varphi_{\Gamma}$ , присоединенный момент –  $M_{\text{вн}}$ .

Уравнение динамики относительно старших производных присоединенных переменных (без учета их начальных состояний) описывается в виде:

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

где  $\chi \triangleq [m_{\text{к}}(R_{\text{к}}^2 + r_{\text{к}}^2) + m_{\Gamma}R_{\text{к}}^2]m_{\Gamma}(l_{\Gamma}^2 + r_{\Gamma}^2) - m_{\Gamma}^2R_{\text{к}}^2l_{\Gamma}^2\cos^2(\theta + \varphi_{\Gamma})$ .

Эту модель далее используем для построения закона управления.

**Построение адаптивной системы управления.** Из второго равенства (1), используя подход обратной модели [13], можно записать, с использованием вводимых параметров  $a_1, a_2, a_3, \tilde{a}_4$ :

$$\begin{aligned} M_{\text{дв}} = & \underbrace{\left[ \frac{\chi}{-m_{\Gamma}R_{\text{к}}l_{\Gamma}\cos(\theta + \varphi_{\Gamma})} \right]}_{\triangleq a_1} \ddot{\varphi}_{\Gamma} + \underbrace{[-m_{\Gamma}R_{\text{к}}l_{\Gamma}]}_{\triangleq a_2} \sin(\theta + \varphi_{\Gamma}) \dot{\varphi}_{\Gamma}^2 + \\ & + \underbrace{\left[ \frac{[m_{\text{к}}(R_{\text{к}}^2 + r_{\text{к}}^2) + m_{\Gamma}R_{\text{к}}^2]m_{\Gamma}gl_{\Gamma}}{m_{\Gamma}R_{\text{к}}l_{\Gamma}} \right]}_{\triangleq a_3} \frac{\sin\varphi_{\Gamma}}{\cos(\theta + \varphi_{\Gamma})} + \\ & + \underbrace{\left[ F_{\text{тр}}R_{\text{к}} + (m_{\text{к}} + m_{\Gamma})gR_{\text{к}}\sin\theta + \frac{[m_{\text{к}}(R_{\text{к}}^2 + r_{\text{к}}^2) + m_{\Gamma}R_{\text{к}}^2]M_{\text{вн}}}{m_{\Gamma}R_{\text{к}}l_{\Gamma}\cos(\theta + \varphi_{\Gamma})} \right]}_{\triangleq \tilde{a}_4}. \end{aligned}$$

Предполагаем, что  $|\theta| \leq 15^\circ$ , поэтому

$$\begin{aligned} \sin(\theta + \varphi_{\Gamma}) &= \sin\theta\cos\varphi_{\Gamma} + \cos\theta\sin\varphi_{\Gamma} \approx \sin\varphi_{\Gamma}; \\ \cos(\theta + \varphi_{\Gamma}) &= \cos\theta\cos\varphi_{\Gamma} - \sin\theta\sin\varphi_{\Gamma} \approx \cos\varphi_{\Gamma}. \end{aligned}$$

Отсюда обращённую модель объекта по угловому движению, учитывая  $\ddot{\varphi}_{\Gamma} \equiv \ddot{\varphi}$ ,  $\dot{\varphi}_{\Gamma} \equiv \dot{\varphi}$ , можно описать через измеряемые переменные как:

$$M_{\text{дв}} \approx a_1 \ddot{\varphi} + a_2 \sin \varphi \dot{\varphi}^2 + a_3 \operatorname{tg} \varphi + a_4, \quad (2)$$

где параметр  $a_4$  удовлетворяет равенству:  $a_2 \sin \varphi_{\Gamma} \dot{\varphi}^2 + a_3 \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma} + \tilde{a}_4 \equiv a_2 \sin \varphi \dot{\varphi}^2 + a_3 \operatorname{tg} \varphi + a_4$ .

В соответствии с методикой построения адаптивного управления на основе идентификационного алгоритма [10, 13], уравнение (2) дальше будем использовать для оценивания неизвестных параметров  $a_1, a_2, a_3, a_4$  с использованием алгоритма текущей идентификации, в котором:  $M_{\text{дв}}$  – отклик;  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$  – оценки искомым параметров;  $\ddot{\varphi}, (\sin \varphi \dot{\varphi}^2), \operatorname{tg} \varphi, 1$  – регрессоры.

Неявную эталонную модель, описывающую желаемое угловое движение, задаем в виде колебательного звена (рис. 3)

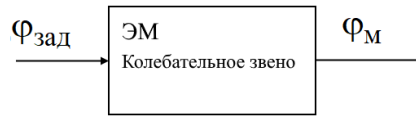


Рис. 3. Эталонная модель

$$\ddot{\varphi}_M = a_{M1} \dot{\varphi}_M + a_{M0} \varphi_M - a_{M0} \varphi_{\text{зад}}, \quad (3)$$

где  $a_{M1} = -2\xi_M \omega_M$ ;  $a_{M0} = -\omega_M^2$ ;  $\omega_M$  – задаваемая собственная частота;  $\xi_M$  – относительный коэффициент затухания.

В соответствии с назначенной эталонной моделью (3) желаемая динамика объекта будет описываться как:

$$\ddot{\varphi}_{\text{жел}} = a_{M1} \dot{\varphi} + a_{M0} (\varphi - \varphi_{\text{зад}}). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2) вместо  $\ddot{\varphi}$ , найдем точный закон управления (основан на точных значениях параметров):

$$M_{\text{дв}} = a_1 [a_{M1} \dot{\varphi} + a_{M0} (\varphi - \varphi_{\text{зад}})] + a_2 \sin \varphi \dot{\varphi}^2 + a_3 \operatorname{tg} \varphi + a_4.$$

А поскольку у нас в распоряжении будут находиться только текущие оценки параметров, то реальный закон управления, построенный на последних, будет в виде:

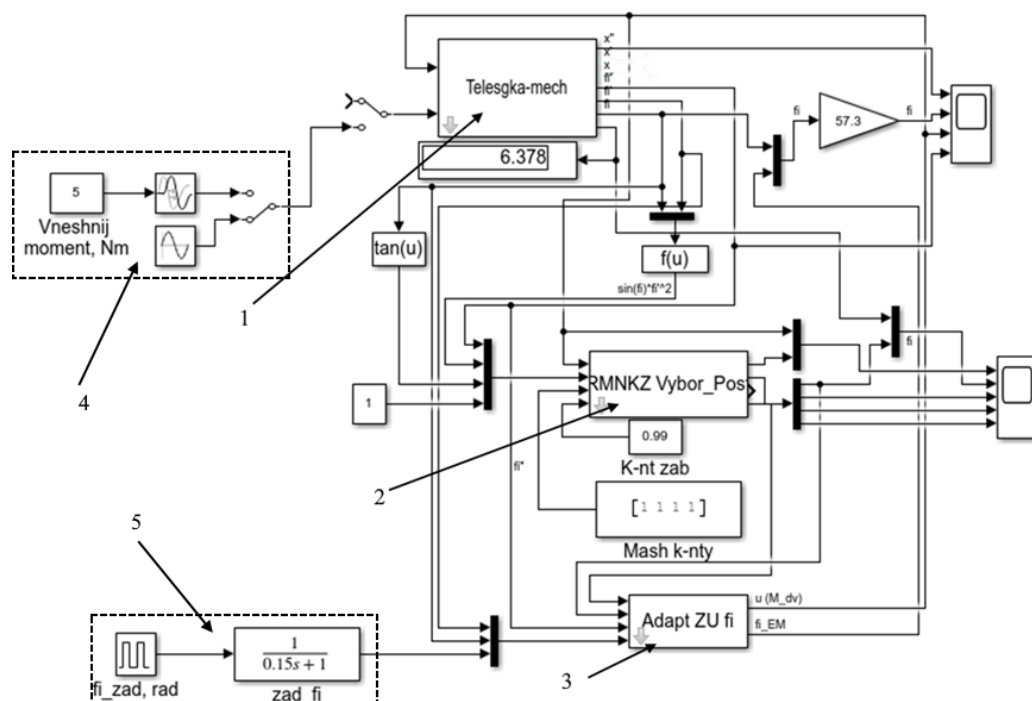
$$M_{\text{дв}} = \hat{a}_1 [a_{M1} \dot{\varphi} + a_{M0} (\varphi - \varphi_{\text{зад}})] + \hat{a}_2 \sin \varphi \dot{\varphi}^2 + \hat{a}_3 \operatorname{tg} \varphi + \hat{a}_4. \quad (5)$$

В соответствии с «упрощенными» условиями адаптируемости [14], основным требованием к алгоритму идентификации является то, чтобы в замкнутой системе управления выполнялось:

$$\operatorname{sign} \left( \hat{a}_1 \right) = a_1; \quad 0.5 |a_1| \leq \left| \hat{a}_1 \right| \leq 2 |a_1|; \quad \frac{d \hat{a}_1}{dt} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Это является достаточно простым требованием.

**Модельные исследования.** В программной среде MatLab/Simulink была составлена имитационная модель балансирующей тележки (пакете SimMechanics/Multibody), соответствующая (1); построен алгоритм текущей идентификации уравнения (2) – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [5]; а также закон управления (5) – см. рис.3.



**Рис. 3.** Модель управления с ПИД – регулятором. 1 – подхема, моделирующая динамику двухколесной балансирующей тележки; 2 – блок идентификации параметров объекта управления; 3 – блок расчета управляющего сигнала; 4 – блок внешних возмущений; 5 – задаваемый угол наклона тележки с фильтром низких частот для сглаживания сигнала.

Параметры объекта управления принимаем следующие:  $m_k = 10$  кг;  $R_k = 0.1$  м;  $r_k = 0.07$  м; параметры эталона:  $\xi_M = 0.9$ ;  $\omega_M = 1$  Гц; коэффициент забывания алгоритма идентификации 0.99. Шаг прсчета составляет 0.01с.

Исследования проводились для различных типовых вариантов груза, представленных в таблице, а также при различных наклонах поверхности. Исходные условия соответствуют [8].

**Таблица** Варианты перевозимого груза

№	Наименование	Масса груза ( $m_r$ ), кг	Высота центра масс груза ( $R_k + l_r$ ), 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

Результат моделирования для первого варианта представлен на рис. 5. На рис.6 приведено текущее значение оценки  $\hat{a}_1$ . Из него следует, что эта оценка соответствует требованиям (6). Качество поведения системы управления при других вариантах груза существенно не отличается от этого.

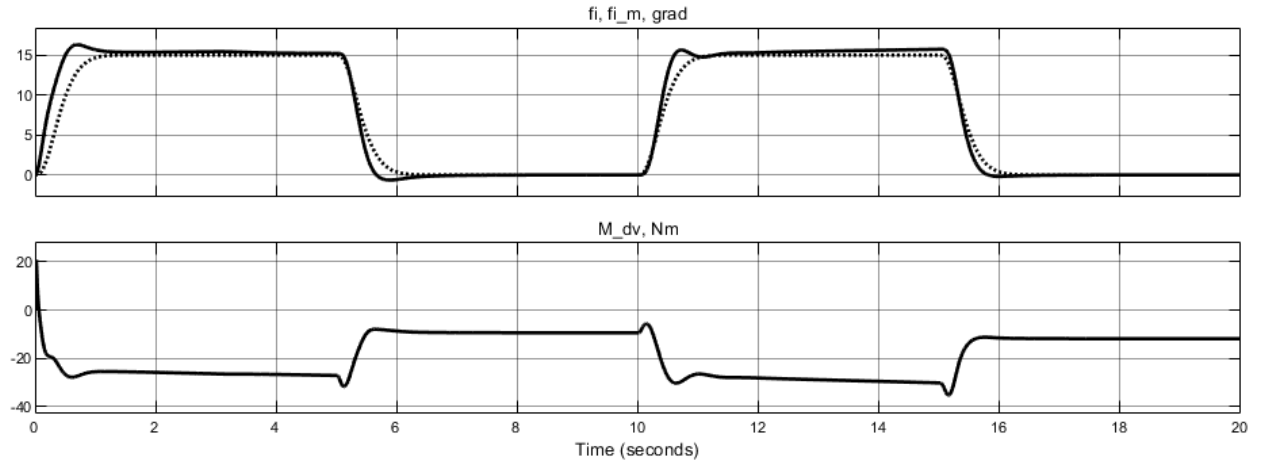


Рис.4. Графики переходных процессов адаптивной системы управления.  $\hat{f}_i$  – реальный угол наклона тележки в градусах (сплошная линия);  $\hat{f}_i^m$  – эталонный угол наклона тележки в градусах (пунктирная линия);  $M_{dv}$  – момент двигателя в Н.

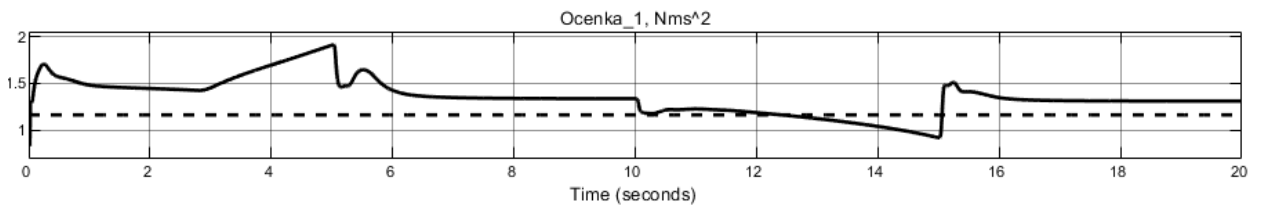


Рис. 6. График оценки параметра  $\hat{a}_1$ . Сплошной линией обозначена текущая оценка; пунктирной линией обозначено точное значение.

На рис.8 представлены сравнительные данные по вариантам груза и при различном угле наклона опорной поверхности  $\theta$  от 0 до 30 град (разными оттенками обозначены различные углы наклона поверхности). В качестве сравниваемой характеристики использовалось время регулирования при реакции на ступенчатый входной сигнал.

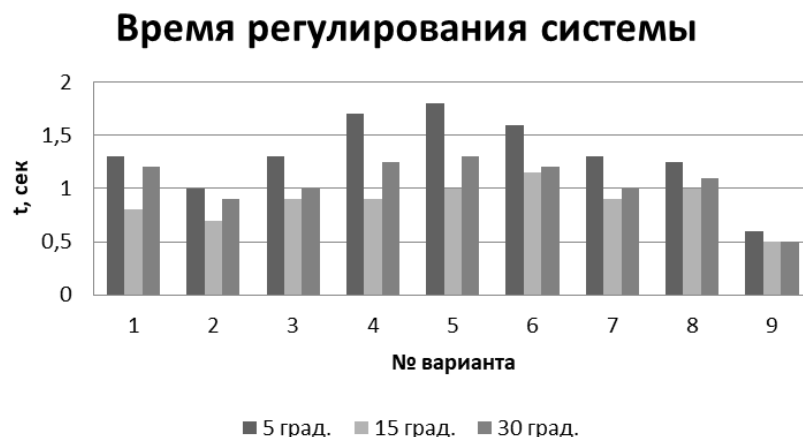


Рис.7. Характеристики системы управления в зависимости от изменений параметров груза

Из представленных данных следует, что максимальное время регулирования составляет 1.8 секунды. Но в любых вариантах загрузки и указанном внешнем воздействии система управления обеспечивает устойчивое движение тележки. Это нельзя сказать для варианта с ПИД-регулированием [4, 8, 9, 15].

Дополнительные исследования с воздействием на тележку умеренных значений внешних возмущений:  $\Delta\varphi$ ,  $M_{\text{вн}}$ ,  $F_{\text{тр}}$  – система также обеспечивала устойчивое движение тележки.

**Заключение.** Результаты моделирования указывают на высокую эффективность адаптивной системы управления с предложенным алгоритмом адаптивного управления по сравнению с ПИД-регулированием. Система в априорно неопределённых условиях очень быстро подстраивается к неизвестным и изменяющимся параметрам объекта управления и внешним возмущениям. Адаптивное управление обеспечивает устойчивое поведение двухколесной балансирующей тележки в широком диапазоне ее загрузки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иловайский Н.Д., Киселёв А.Н. Сервис на транспорте. – М.: Транспорт, 2003. – 584 с.
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. Advaced PID Control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. 460 p.
4. Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Филатова С.Н., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 117-125.
5. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Ларченко А.Г., Филатова С.Н. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55-65.
6. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 171-175.
7. Буторин Д.В. Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06 / Буторин Денис Витальевич. – Иркутск, 2018. 174 с.
8. 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).
9. Буторин Д.В., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах // Информационные системы и технологии. 2017. № 1 (99). С. 44-53.
10. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. – 432 с.
11. 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.



12. 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.
13. Круглов С.П. Идентификационное адаптивное управление с инверсной моделью динамики объекта // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. –2019. –№3. –С. 1-10– Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/34-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 16.05.2020).
14. Круглов С.П. Адаптивная автоматизация пилотирования самолетом на больших углах атаки на основе упрощенных условий адаптируемости. Монография. Иркутск: Иркутский филиал Московского государственного университета гражданской авиации, 2012. – 248 с.
15. Butorin D. Automated control system to monitor dielectric losses in polymers // MATEC Web of Conferences 2018. С. 02003.

## REFERENCES

1. Пловajский N.D., Kiselyov A.N. Servis na transporte [Service on transport]. Moscow. Transport, 2003,-584 p.
2. Programma povыsheniya 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.Hagglunb Advaced PID Control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. 460 p.
4. Butorin D.V., Filippenko N.G., Filatova S.N., Livshic A.V., Kargapol'cev S.K. Avtomatizatsiya kontrolya strukturnykh prevrashchenij v polimernykh materialah pri elektrotermicheskoy obrabotke [Automation of control of structural transformation in polymeric materials at heat treatment] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2016. No 1 (49). pp. 117-125
5. Livshic A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya obrabotka nemetallichesкого вторичного syr'ya [High-frequency electrothermal processing of non-metallic secondary raw materials] // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman. 2014. No 6. pp. 55-65.
6. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V. Opredeleniye fazovykh i relaksatsionnykh perekhodov v polimernykh materialakh [Determination of phase and relaxation transition in polymer materials] // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii. 2017. Vol. 71. № 4. pp. 171-175.
7. Butorin D.V. Avtomatizatsiya upravleniya protsessami vysokochastotnoy obrabotki polimernykh materialov raznoy stepeni polyarnosti [Automation of control of processes of high-frequency processing of polymeric materials of different degree of polarity]: dis. ... kan. tekhn. nauk 05.13.06 / Butorin Denis Vital'yevich. – Irkutsk, 2018. 174 p.
8. Kруглов S.P., Роман`ков S.A. Analysis of use of PIDcontrol of universal cargo two-wheeled balancing trolley// Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2020. No. 1(6). pp. 28-36. DOI: 10.26731/2658-3704.2020.1(6).28-36[Accessed 20/01/2020].
9. Butorin D.V., Livshits A.V., Filippenko N.G. Avtomatizatsiya protsessa kontrolya fazovykh i relaksatsionnykh prevrashcheniy v polimernykh materialakh [Automation process control

- of phase and relaxation transformation in polymer materials] // *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii*. 2017. No 1 (99). pp. 44-53.
10. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*, University of Linköping, Sweden (Russ. ed.: Ljung L. *Identifikacija sistem: teorija dlja pol'zovatelja*, Moscow, Nauka, 1991, 432 p.).
  11. Ivojlav 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 programmnaya inzheneriya*. 2014. No 2. pp. 15-21.
  12. Fedorov D.S., Ivojlav 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 programmnaya inzheneriya*. 2015. No 2. pp. 16-34.
  13. Kruglov S.P. *The identification adaptive control with inverse model of the object dynamics* // *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], 2019. No. 3. pp. 1-10. [Accessed 16/05/20]
  14. Kruglov S.P. *Adaptivnaya avtomatizaciya pilotirovaniya samoletom na bol`shix uglax ataki na osnove uproshhenny`x uslovij adaptiruемости* [Adaptive automation of aircraft piloting at high angles of attack based on simplified adaptability conditions], Monograph. Irkutsk, Irkutskij filial Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviacii [Irkutsk branch of the Moscow State University of Civil Aviation], 2012. 248 p.
  15. Butorin D. *Automated control system to monitor dielectric losses in polymers* // *MATEC Web of Conferences* 2018. P. 02003.

#### **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)