

С. А. Исупов¹, К. И. Дьяконов¹, С. П. Круглов¹, С. В. Ковыршин¹

¹ ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Российская Федерация

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МЕХАТРОННОЙ ПЛАТФОРМЫ «АВТОКАТ»

Аннотация. В статье описывается новая мехатронная платформа, имеющая авторское наименование «Автокат». Она может служить для создания системы передвижения автономного одноколейного мобильного робота, а также и в качестве индивидуального транспортного средства для человека. Анализируются преимущества данной платформы как индивидуального транспортного средства в сравнении с известными подобными решениями. Рассматривается принцип построения, особенность использования, математическая модель, закон управления для балансировки, а также возможные подходы к построению электронной части системы управления рассматриваемой мехатронной платформы.

Ключевые слова: одноколейная мобильная мехатронная платформа, индивидуальное транспортное средство, математическая модель, система управления, ПИ-регулятор.

S. A. Isupov¹, K. I. Dyakunov¹, S. P. Kruglov¹, S. V. Kovyrshin¹

¹ Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education «Irkutsk State University of Railway Engineering», Russian Federation

DEVICE AND OPERATING PRINCIPLE OF THE MECHATRONIC PLATFORM "AUTOCAT"

Annotation. The article describes a new mechatronic platform with the author's name "Autocat." It can serve to create a system of movement of an autonomous single-track mobile robot, as well as an individual vehicle for a person. The advantages of this platform as an individual vehicle compared to known similar solutions are analyzed. The principle of construction, the feature of use, the mathematical model, the law of control for balancing, as well as possible approaches to the construction of the electronic part of the control system of the mechatronic platform in question are considered.

Keywords: single-track mobile mechatronic platform, individual vehicle, mathematical model, control system, PI controller.

Введение

В современном мире все больше приобретает актуальность двухколесный индивидуальный транспорт с электрической тягой, за счет таких явных преимуществ как доступность приобретения, дешевизна в обслуживании, малогабаритность, маневренность, а также экологичность.

В настоящее время получили широкое распространение несколько мобильных автоматизированных транспортных средств (АТС), таких систем как гироскутер, электросамокат, скейтборд и моноколесо [1]. Принципы движения, используемые в данных АТС, используются некоторыми разработчиками мобильных роботов в качестве системы передвижения по поверхности. У каждой платформы есть свои достоинства и недостатки. Рассмотрим недостатки. Например: недостатком гироскутера являются ограниченная устойчивость на высоких скоростях и на неровных поверхностях; у электросамоката отсутствует системы стабилизации и ограничения для эксплуатации людям с плохим вестибулярным аппаратом; платформа типа скейтборд-доска способна передвигаться только на относительно ровных поверхностях, что в случаях использования ее как индивидуальное транспортное средство, влечёт за собой травмоопасность и требует навыков езды.

Рассмотрев, представленные выше системы, и проанализировав их положительные и отрицательные свойства, было решено создать систему, исключаящую большую часть недостатков рассмотренных выше систем. Авторским коллективом была разработана

универсальная одноколейная роботизированная платформа, которая может быть использована в равной степени как индивидуальное транспортное средство, так и платформа для построения мобильного робота. Коллектив разработчиков присвоил платформе название «Автокат» [1]. В статье приведен пример ее использования в качестве индивидуального транспортного средства.

Описание платформы «Автокат»

Общий вид транспортного средства представлен на рис. 1.

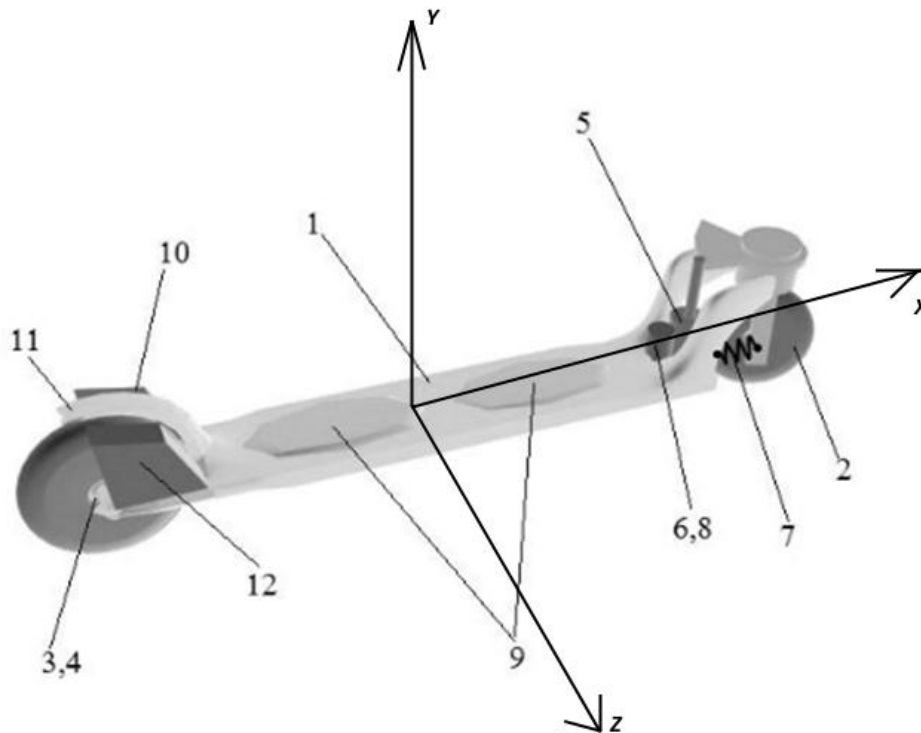


Рис. 1. Общий вид АТС «Автокат»

«Автокат» содержит опорную платформу-доску (1), переднее (2) и заднее колесо (3), прикреплённые к платформе. Переднее колесо – рулевое, определяющее направление движения при повороте его вокруг поворотной оси, которая является подпружиненной (7) с нейтральным положением, соответствующем нулевому углу поворота. Приводным колесом, создающим скорость движения, может быть либо переднее, либо заднее колесо. Приводное колесо содержит датчик скорости вращения колеса.

В состав транспортного средства также входят: приводной двигатель (4); рулевой серводвигатель (5), связанный с рулевым колесом через переключаемую передачу (6); блок управления (10), содержащий систему управления приводным двигателем, систему управления рулевым серводвигателем, а также систему управления аварийным механизмом; механический тормоз (11); блок аккумуляторных батарей (12).

Система управления приводным двигателем содержит: микроконтроллер, датчик положения центра тяжести наездника (в виде датчиков веса (9), формирующих информацию о положении центра тяжести наездника-оператора) и драйвер управления приводным двигателем. Система управления рулевым серводвигателем содержит: микроконтроллер, датчик крена, датчик бокового ускорения, датчик скорости вращения приводного колеса и драйвер рулевого серводвигателя. Система управления аварийным механизмом содержит: логическую схему управления аварийным механизмом, датчики напряжения на рулевом серводвигателе и блоке управления, а также сигнализацию.

Способ использования предлагаемого транспортного средства заключается в автоматическом отклонении его рулевого колеса для обеспечения балансировки наездника и координированности поворотов (с обеспечением направления вектора силы тяжести

вдоль тела наездника). То есть для поворота достаточно отклонить тело наездника вправо или влево. Разгон и торможение осуществляется также наклонами тела наездника, только вперёд и назад (с использованием датчиков веса). Аварийная система необходима для подачи сигнала наезднику и выравнивание рулевого колеса при снижении заряда аккумуляторной батареи ниже критического уровня.

Математическая модель системы «Автокат»

На рис. 2 представлена расчётная схема транспортного средства с параметрами, используемыми для математического описания динамики движения двухколёсного велосипеда в линеаризованном виде: координаты центра тяжести и колёсная база [2].

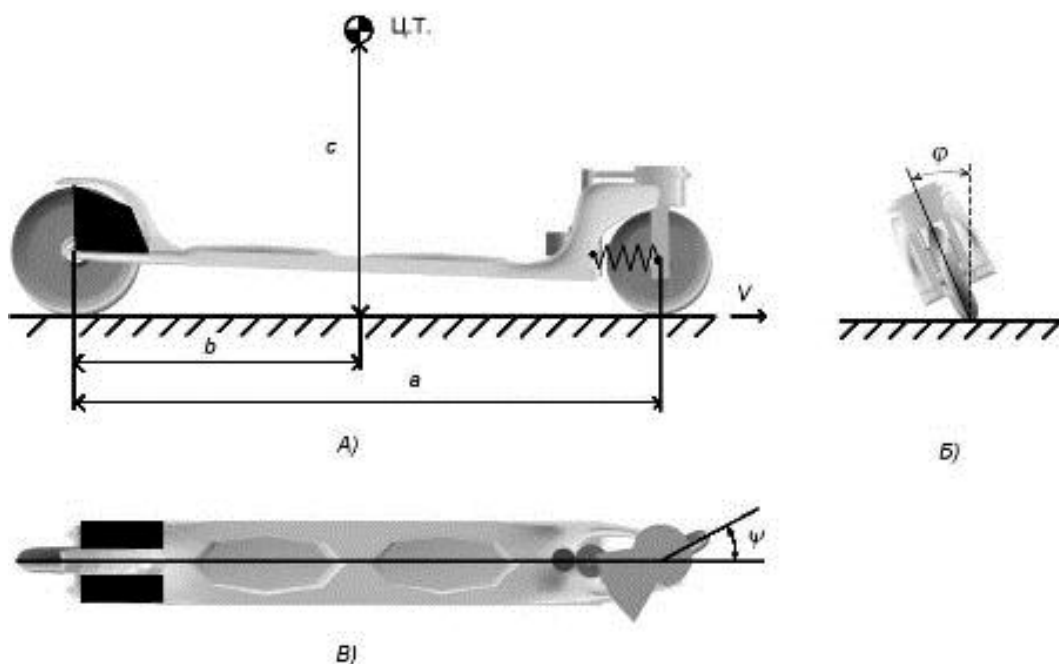


Рис. 2. Расчетная модель

На рисунке обозначены следующие параметры и переменные: φ – угол крена – угол отклонения плоскости симметрии транспортного средства от вертикальной плоскости, проходящей вдоль траектории движения; ψ – угол поворота рулевого колеса, измеряемый в плоскости горизонта; V – скорость движения; ε – боковое ускорение, ускорение в плоскости платформы транспортного средства и перпендикулярное направлению движения; a – колесная база – расстояние между центрами осей заднего и переднего колеса; b, c – координаты центра тяжести системы «автокат-наездник» в плоскости симметрии транспортного средства относительно точки опоры заднего колеса.

Известно [2], что динамика угла крена двухколесного одноколейного транспортного средства, типа велосипеда, в линеаризованном виде с малыми отклонениями от опорного положения может быть описана как:

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{g}{c} \varphi(t) + \frac{bV}{ac} \dot{\psi}(t) + \frac{V^2}{ac} \psi(t) + \mathcal{A}(t), \quad (1)$$

где t – текущее время; g – ускорение свободного падения; $\mathcal{A}(t)$ – внешнее возмущение, появляющееся из-за выхода центра тяжести системы с плоскости симметрии транспортного средства.

Из этого равенства при отсутствии внешнего возмущения несложно определить установившиеся значения углов крена и поворота рулевого колеса, соответствующие координированному повороту при $\ddot{\varphi}(t) \equiv 0, \dot{\psi}(t) \equiv 0, V = \text{const}$:

$$\psi_{\text{разв}} = -\frac{ag}{V^2} \varphi_{\text{разв}}, \quad (2)$$

где $\psi_{\text{разв}}, \varphi_{\text{разв}}$ – постоянные значения угла поворота рулевого колеса и крена, обеспечивающие координированный разворот.

Закон управления

За основу закона управления берется зависимость (2) из математического описания, с добавлением ПИ-регулирования [3-5] (второе и третье слагаемое):

$$\psi_{\text{разв}} = -\frac{ag}{V^2} \varphi_{\text{разв}} + k_{\text{п}} n_z + k_{\text{и}} \int_0^t n_z(t) dt, \quad (3)$$

где n_z – боковое ускорение; $k_{\text{п}}, k_{\text{и}}$ – настраиваемые коэффициенты ПИ-регулятора.

По зависимости (3) для нахождения угла поворота руля $\psi_{\text{разв}}$, необходимо вычислять значения скорости V , угла крена ($\varphi_{\text{разв}}$) и бокового ускорения (n_z).

Вычисление скорости. Исходя из простоты реализации для вычисления скорости предлагается использовать магнитный датчик холла [6-9]. Датчики Холла (или датчики положения) – это чувствительные элементы, реагирующие на величину воздействующего на них магнитного поля [8]. Для реализации вычислений скорости создается пластина, крепящаяся к ведомому колесу. К данной пластине крепятся 6 магнитов на одинаковом расстоянии друг от друга, а возле предполагаемого места прохождения магнитов фиксируется датчик Холла.

Для вычисления скорости движения используется формула

$$V = 2\pi r \frac{\Delta x}{6\Delta t},$$

где Δx – 1/6 периметра колеса; Δt – время за которое повернулось колесо на 1/6 от полного оборота; r – радиус колеса.

Вычисления значений угла крена. Определение угла крена производится с помощью датчика угловых скоростей, предположительно MPU6050. У данного типа датчиков есть недостаток, зашумленность на низких частотах (дрейф). Данная проблема решается путем усреднения значений шумов и вычитания их из текущего значения угловой скорости. Вычисление угла крена производится путём интегрирования угловой скорости (далее представлено в зависимости (4)).

Следует отметить, что у данного способа есть недостаток: при сложном движении (когда тело вращается сразу по нескольким осям, например при движении с креном, поворотом и по пересечённой местности), если датчик установлен не идеально, проекции угловых скоростей накладываются друг на друга, как это показано на рисунке 4, что дает накопление угла (ошибку). Уравнения, описывающие такую взаимосвязь можно представить следующим образом [10]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\varphi} + \dot{\theta} \sin \mu; \\ \omega_y &= \dot{\theta} \cos \mu \cos \varphi + \dot{\mu} \sin \varphi; \\ \omega_z &= \dot{\mu} \cos \varphi - \dot{\theta} \cos \mu \cos \varphi. \end{aligned}$$

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вокруг осей OX OY OZ (см. рис.1); φ, μ, θ – углы крена, тангажа и рысканья соответственно (авиационные термины).

Минимизировать это воздействие можно добавив второй датчик угловых скоростей, и расположив его так что бы оси вращения угла крена смотрели в одну сторону, а другие две оси – в противоположные. Таким образом, проекции ненужных угловых скоростей будут компенсировать друг друга (рис. 3).

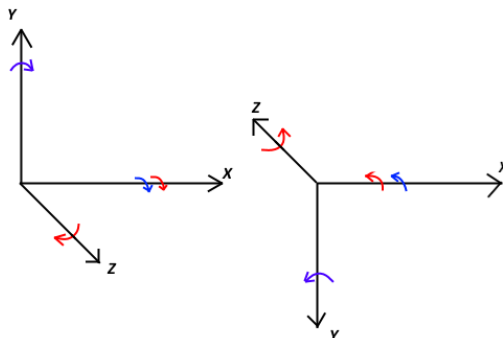


Рис. 3. Системы координат двух датчиков угловых скоростей

Такое решение полностью минимизирует проекции угловых скоростей, при условии, что датчики стоят абсолютно точно по осям координат. На практике это не так, поэтому предлагается использовать дополнительную поправку при вычислении угла крена:

$$\varphi_{\text{разв}} = \int_0^t \left(\frac{\omega_{x1} + \omega_{x2}}{2} - k_y \frac{\omega_{y1} + \omega_{y2}}{2} - k_z \frac{\omega_{z1} + \omega_{z2}}{2} \right) dt, \quad (4)$$

где, нижним индексом «1» указан первый датчик угловой скорости, «2» – второй; k_y, k_z – поправочные коэффициенты, подбираются экспериментально.

Измерение бокового ускорения (n_z) реализуется с помощью датчика MPU6050, который обладает такой возможностью.

Управление скоростью

Управление скоростью осуществляется при помощи датчиков веса (передние и задние, см. рис.1). Так как амплитуда изменений напряжений с тензометрических датчиков веса изменяется очень слабо, необходим преобразователь для увеличения сигнала. Схему получения данных с датчиков веса предлагается реализовать двумя способами:

1. Преобразование данных при помощи операционных усилителей (ОУ) и подача их на аналоговый вход микроконтроллера (МК), см. рис.4, 5.



Рис. 4. Структурная схема включения датчиков веса, через ОУ

Электрическая схема данной системы представлена на рис.5.

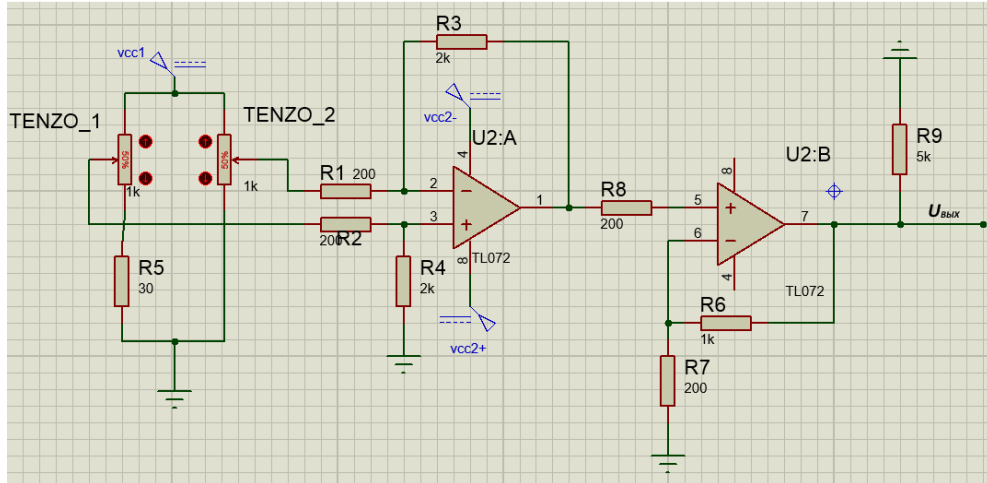


Рис. 5. Электрическая схема двухкаскадного ОУ с подключёнными тензодатчиками

На рисунке обозначено: TENZO_1 и TENZO_2 – передние и задние тензо-резисторы; R1, R2, R3, R4, R6, R7 – резисторы устанавливающие математическую функцию и коэффициенты усиления на ОУ; U2:A и U2:B – двухкаскадный операционный усилитель; R9 – стягивающий шумы резистор; vcc1 и vcc2 – питающие элементы схемы; $U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение направленное на аналоговый вход МК.

- Преобразование данных при помощи высоко разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [11] и передача их пакетами на микроконтроллер, см. рис.6,7.

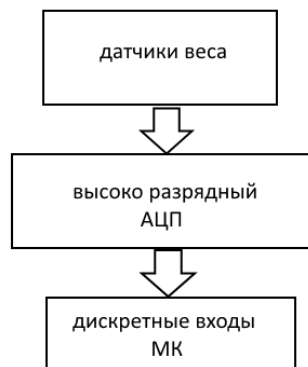


Рис. 6. Структурная схема включения датчиков веса, через АЦП

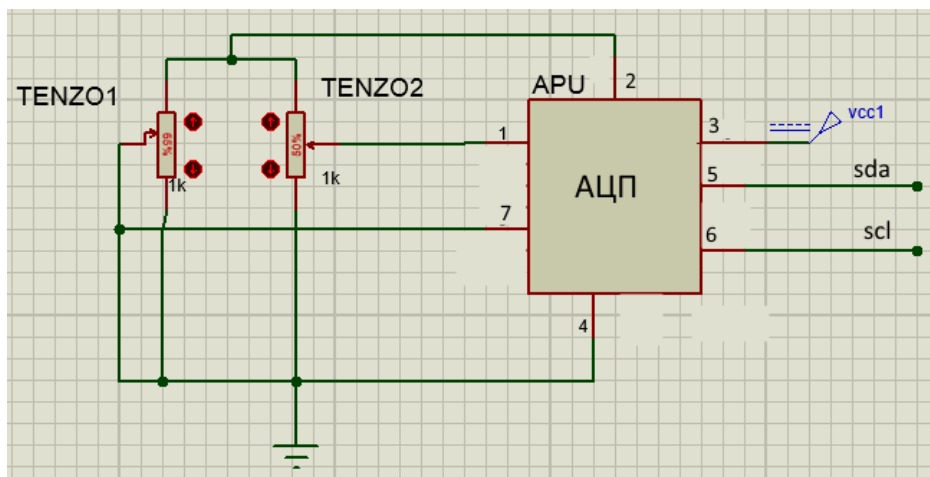


Рис. 7. Электрическая схема включения датчиков веса, через АЦП

На рисунке обозначено: TENZO_1 и TENZO_2 – передние и задние тензо-резисторы; АРУ – высокоразрядный АЦП; vcc1 – питающее напряжение; scl и sda – интерфейс передачи данных на МК.

При получении данных/пакета данных через высокоразрядный АЦП, МК может обрабатывать данные со значительной задержкой, это значительно скажется на работе всей системы [3, 4, 7]. Для решения этой задачи предлагается использовать дополнительный МК [12], который не будет влиять на работу основного, и передавать данные в виде ШИМ сигнала через RC цепочку см. рис. 8, 9).



Рис. 8. Структурная схема включения датчиков веса, через дополнительный МК.

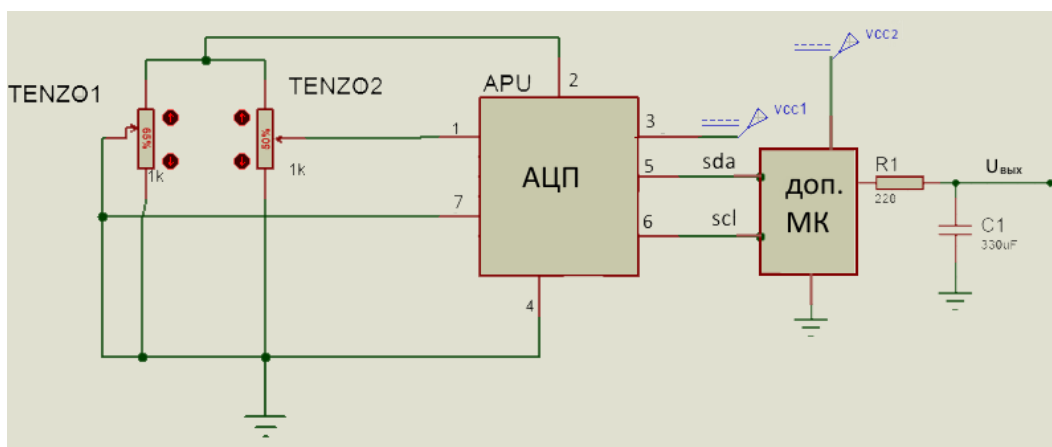


Рис. 9. Электрическая схема включения датчиков веса, через дополнительный МК

На рисунке представлено: TENZO_1 и TENZO_2 – передние и задние тензо-резисторы; АРУ – высоко разрядный АЦП; vcc1 – питающее напряжение; scl и sda – интерфейс передачи данных на МК; R1 и C1 – RC цепь преобразующая ШИМ с дополнительного МК в аналоговый сигнал [3, 13]; $U_{\text{вых}}$ – напряжение направленное на аналоговый вход МК.

Заключение

Проанализировав индивидуальное средство «Автокат» [1], были рассмотрены его особенности реализации. При его создании были использованы следующие решения: датчик холла для измерения скорости системы; два датчика угловых скоростей,

расположенных определенным образом для компенсации внешних воздействий; датчик для измерения бокового ускорения; интеллектуальный мехатронный модуль, состоящий из датчиков веса, высокоразрядного АЦП, МК, и РС цепочки, для управления системой путём перемещения центра тяжести. Закон управления (3) реализуется в основном микроконтроллере.

Данное транспортное средство относится к одноколейным двухколесным мехатронным индивидуальным транспортным средствам, отличающееся малыми габаритами и весом, а также не требующим специальной подготовки для использования. Его отличают простота управления – отклонением тела оператора-наездника; достаточно высокая скорость передвижения при сохранении устойчивости и др.

Данное транспортное средство можно условно отнести к устройству, занимающему промежуточное положение между моторизованным самокатом и скейтбордом. Также описанное мехатронное устройство может быть использовано для создания платформы автономного одноколейного мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент на изобретение RU 2702365 С1 В62К 3/00, В62М 6/00. Одноколейный двухколесный автоматизированный скутер и способ его использования// Круглов С.П., Ковыршин С.В., Исупов С.А., Дьяконов К.И., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU) – 2018115405 от 24.04.2018, опубликовано 08.10.2019, Бюл.28.

2. Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А. Динамика неголономных систем – М.: Наука, Гл.ред.физ.-мат.лит., 1967.

3. 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.

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. Ларченко А.Г., Попов С.И., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Определение физико-механических параметров полимерных материалов при высокочастотном диэлектрическом нагреве в электротермических установках // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2 (38). С. 152-157.

6. Электронный ресурс: <https://zen.yandex.ru/media/asutpp.ru/chto-takoe-datchik-holla-igde-on-primeniaetsia-5e837a1e76040914a467d2de>

7. Butorin D. Automated control system to monitor dielectric losses in polymers // MATEC Web of Conferences 2018. С. 02003.

8. 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.

9. Butorin D.V. Automation of the process of control of states of polymer materials at electrothermal treatment // VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway conference proceedings. 2018. С. 306-309.

10. Вавилов Ю.А. Системы автоматического управления полетом. – М.: Издание ВВИА им.проф.Н.Е.Жуковского, 2009. – 412 с.

11. Антошкин С.Б., Мухопад Ю.Ф., Пунсык-Намжилов Д.Ц. Статистический метод анализа аналого-цифрового преобразователя информации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 2 (22). С. 119-123.

12. 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.

13. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В., Попов М.С., Гозбенко В.Е. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 96-103.

REFERENCES

1. Patent RU 2702365 C1 B62K 3/00, B62M 6/00. Single-track two-wheeled automated scooter and method of use. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Isupov S.A., Diakonov K.I., 2018115405 from 04.24.2018, published 08.10.2019, Bull. 28.

2. Neymark Yu.I., Fufaev N.A. Dinamika negolonomny`x sistem [Dynamics of nonholonomic systems], Moscow, Nauka, Gl.red.phys.-mat. lit., 1967.

3. Livshic A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya obrabotka nemetallichesкого вторичного сыр'я [High-frequency electrothermal processing of non-metallic secondary raw materials] // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana. 2014. № 6. pp. 55-65.

4. Butorin D.V., Filippenko N.G., Filatova S.N., Livshic A.V., Kargapol'cev S.K. Avtomatizatsiya kontrolya strukturnykh prevrashchenij v polimernykh materialakh pri elektrotermicheskoy obrabotke [Automation of control of structural transformation in polymeric materials at heat treatment] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2016. № 1 (49). pp. 117-125.

5. Larchenko A.G., Popov S.I., Filippenko N.G., Livshic A.V. Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh parametrov polimernykh materialov pri vysokochastotnom dielektricheskom nageve v elektrotermicheskikh ustanovkakh [Determination of physico-mechanical parameters of polymeric materials during high-frequency dielectric heating in electrothermal installations] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2013. № 2 (38). pp. 152-157.

6. URL: <https://zen.yandex.ru/media/asutpp.ru/chto-takoe-datchik-holla-i-gde-on-primeniatsia-5e837a1e76040914a467d2de>.

7. Butorin D. Automated control system to monitor dielectric losses in polymers // MATEC Web of Conferences 2018. pp. 02003.

8. 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. T. 71. № 4. pp. 171-175.

9. Butorin D.V. Automation of the process of control of states of polymer materials at electrothermal treatment // VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway conference proceedings. 2018. pp. 306-309.

10. Vavilov Yu.A. Sistemy` avtomaticheskogo upravleniya poletom [Auto flight systems]. Moscow, Izdanie VVIA im.prof.N.E.Zhukovskogo, 2009, 412p.

11. Antoshkin S.B., Mukhopad Yu.F., Punsyk-Namzhilov D.C. Statistical method of analysis of analog-digital converting of information. Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2009. Vol. 22, No. 2, pp. 119-123.

12. 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. tekh. nauk 05.13.06 / Butorin Denis Vital'yevich. – Irkutsk, 2018. 174 p.

13. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V., Popov M.S., Gozbenko V.Ye. Avtomatizatsiya izmereniya temperatury polimernogo materiala pri vysokochastotnom

elektrotermicheskom nagreve [Automation of measuring the temperature of a polymer material during high-frequency electrothermal heating] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2017. № 1 (53). pp. 96-103.

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

Ковыршин Сергей Владимирович – к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergkow@mail.ru

Исупов Станислав Андреевич – Студент гр. МРМ-18-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vclvlo@gmail.com

Дьяконов Кирилл Игоревич – Студент гр. МРМ-18-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kirill.duakonov.96@gmail.com

Authors

Kruglov Sergey Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Kovyrshin Sergey Vladimirovich – Ph.D., Associate Professor, Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergkow@mail.ru

Isupov Stanislav Andreevich – Student of gr. MRM-18-1, Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk, e-mail: vclvlo@gmail.com

Dyakonov Kirill Igorevich – Student of gr. MRM-18-1, Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk, e-mail: kirill.duakonov.96@gmail.com