

А. А. Федорова, С. А. Васильев, В. В. Алексеев

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАТРОННОГО ПРОФИЛОГРАФА
ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ДАТЧИКА СКАНИРОВАНИЯ
ПО ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ**

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова

msf68@chuvsu.ru

Приведены математические выкладки, позволяющие сократить время сканирования путем линейного перехода между круговыми траекториями, тривиальными для мехатронного профилографа. Разработаны алгоритм и визуализация перемещения датчика сканирования профилографа по заданной прямолинейной траектории в среде моделирования SimInTech.

Ключевые слова: среда моделирования, сканирование, прямолинейная траектория, датчик сканирования.

A. A. Fedorova, S. A. Vasilyev, V. V. Alekseev

**OPTIMIZATION OF A MECHATRONIC PROFILOGRAPH
BY MOVING THE SCANNING SENSOR ON A STRAIGHT TRAJECTORY**

I. N. Ulyanov Chuvash State University

Mathematical calculations are given that allow to reduce the scanning time by a linear transition between circular trajectories, which are trivial for a mechatronic profiler. An algorithm and visualization of the movement of the profilograph scanning sensor along a given rectilinear trajectory in the SimInTech simulation environment has been developed.

Keywords: modeling environment, scanning, rectilinear trajectory, scanning sensor.

Введение

Автоматизация и роботизация процесса измерений и сканирования позволяет улучшить качество исследования, получить большое количество данных об исследуемых объектах, а также сократить время процесса измерения [1–4]. В зависимости от конкретного применения в измерительном устройстве используется определенная конструкция робота, которая позволяет оптимально решать поставленные задачи [5].

Одной из повседневных задач роботизированных средств измерения является автономное измерение по задаваемым оператором траекториям в штатном режиме. Сократить время перехода от одного режима к другому, в ряде случаев, можно путем отклонения процесса от штатного.

В разработанном мехатронном профилографе [6, 7] (рис. 1), в котором синхронизировано радиальное смещение с вращательным движением, штатным является режим сканирования по окружности или различным типам спиралей. Профилограф представляет собой устройство, состоящее из основания 1, жестко связанного со стойкой 2, на которой установлены угловой датчик 5 и с помощью подшипников качения корпус 3 с блоком питания 6 и блоком управления 7. Вращательное движение корпуса 3 обеспечивается приводом 4 за счет обкатывания сателлита Z_1 вокруг опорного колеса Z_2 . По направляющей 9, установленной в корпусе 3, радиальное движение каретки 10 с лазерным датчиком положения 11 обеспечива-

ется за счет вращения ходового винта 8, приводимого в движение двигателем 4'. Показатели с датчика 11 и блока управления 7 передаются через Bluetooth-соединение 13, 14 на ноутбук

12, оснащенный системой измерения для согласованной работы электродвигателей в процессе измерения, а также программой приема и обработки показателей датчиков 5 и 11.

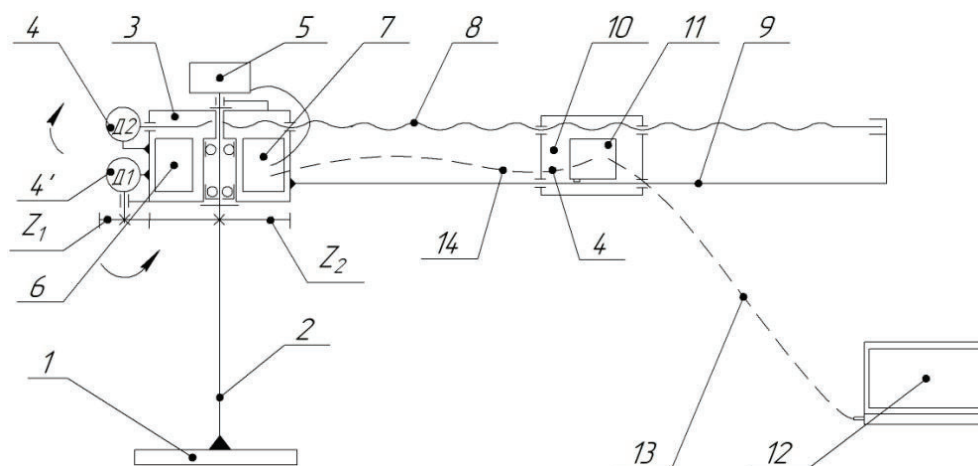


Рис. 1. Схема мехатронного профилографа:

1 – основание; 2 – стойка; 3 – корпус; 4, 4' – двигатели; 5 – угловой датчик (энкодер); 6, 7 – блок питания; 7 – блок управления; 8 – ходовой винт; 9 – направляющая; 10 – каретка; 11 – лазерный датчик положения; 12 – ноутбук; 13, 14 – беспроводные Bluetooth-соединения блока управления с ноутбуком и лазерным датчиком положения соответственно; Z₁ – спутник; Z₂ – опорное колесо

Иногда для оптимизации времени сканирования необходимо переключение в режим сканирования по прямой. Это позволяет сократить время сканирования путем линейного перехода между спиралевидными и круговыми траекториями, тривиальными для разработанного мехатронного профилографа.

Для реализации прямолинейного движения датчика необходимо привести математические выкладки с дальнейшей апробацией, которая требует значительных материальных и человеческих ресурсов при ее выполнении на реальных объектах. В связи с этим рационально использовать математическое представление реальности в среде моделирования с целью экономии материальных ресурсов, уменьшения количества ошибок и обеспечения эффективности труда человека [8, 9].

Целью данной работы является оптимизация мехатронного профилографа перемещением датчика сканирования по прямолинейной траектории. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: приведение математических выкладок перемещения датчика по прямолинейной траектории в мехатронном профилографе; реализация математических формул в выбранной среде моделирования;

разработка алгоритма и визуализация перемещения по заданной траектории.

Методы и материалы

Для реализации в мехатронном профилографе сканирования по прямой линии можно использовать уравнение прямой в полярных координатах (рис. 2):

$$r_i(\varphi) = \frac{l}{\cos(\varphi_i - \alpha)}, \quad (1)$$

где r_i – полярный радиус точки прямой линии, регулируемый приводом Д2; φ_i – полярный угол точки прямой линии, регулируемый приводом Д1; $l(OQ)$ – расстояние от центра координат (полюса) до прямой; α – угол между полярной осью p и нормалью к прямой.

Одним из вариантов исходных входных данных для реализации сканирования по прямой может являться следующий набор: минимальный $r_{\min}$ и максимальный $r_{\max}$ радиусы сканирования; абсциссы и ординаты задаваемых точек M и N отрезка $x_{m(n)}$ и $y_{m(n)}$. При этом $r_{\min}$ и $r_{\max}$ задаются конструктивно; координаты точек M и N задаются в области, ограниченной радиусами сканирования.

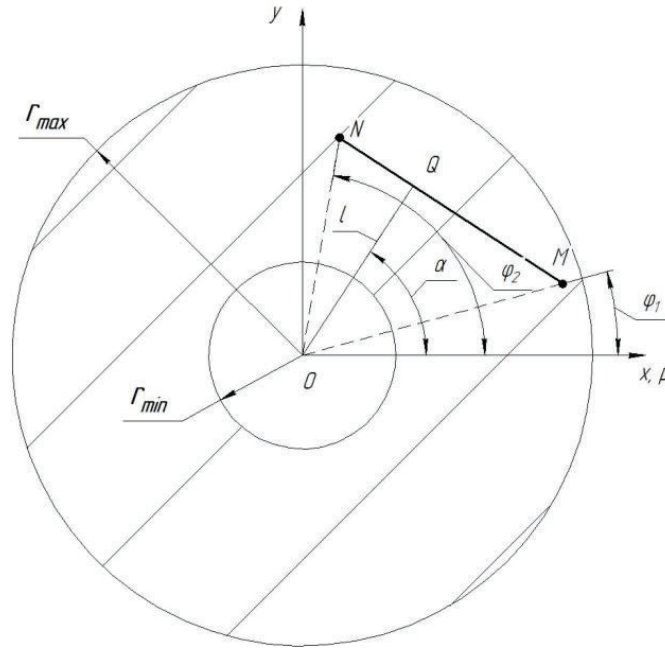


Рис. 2. Прямолинейная траектория сканирования профилографом

Если принять, что первой задаваемой координатой будет абсцисса $x_{m(n)}$, которая принадлежит заданной области:

$$x_{m(n)} \in [-r_{\max}; r_{\max}], \quad (2)$$

то при этом ордината будет принадлежать области:

$$y_{m(n)} \in [-\sqrt{r_{\max}^2 - x_i^2}; \sqrt{r_{\max}^2 - x_i^2}], \quad (3)$$

Кроме этого, если абсцисса точек лежит в заданных пределах:

$$x_{m(n)} \in [-r_{\min}; r_{\min}], \quad (4)$$

то не может принимать значения в следующей области:

$$y_{m(n)} \notin [-\sqrt{r_{\min}^2 - x_i^2}; \sqrt{r_{\min}^2 - x_i^2}], \quad (5)$$

Принято допущение о том, что сканирование реализуется против часовой стрелки и точки M и N задаются таким образом, что полярный угол до точки M φ_1 меньше полярного угла до точки N φ_2 .

Полярные углы φ_1 и φ_2 определяются по формуле

$$\varphi_{1(2)} = \arctan \frac{y_{m(n)}}{x_{m(n)}} + k\pi. \quad (6)$$

Коэффициент k в зависимости от положе-

ния точек принимает следующие значения:

- $[0; \pi/2]$: $k = 0$;
- $[\pi/2; 3/2\pi]$: $k = 1$;
- $[3\pi/2; 2\pi]$: $k = 2$.

При этом углы ограничены одним оборотом $\varphi_i \in [0, 2\pi]$.

Для реализации движения по прямой (1) в полярных координатах были определены расстояние l и угол α из уравнения прямой NM ,

с угловым коэффициентом $k = \frac{y_m - y_n}{x_m - x_n}$.

$$\alpha = \arctan \left(-\frac{x_m - x_n}{y_m - y_n} \right) + k\pi. \quad (7)$$

Используя классическую формулу для расстояния от центра координат до прямой l , получаем:

$$l = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{\left| -\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} x_n + y_m \right|}{\sqrt{\left(\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} \right)^2 + 1}}. \quad (8)$$

С учетом вышеизложенного, возвращаясь к формуле (1), было получено:

$$r_i(\varphi) = \frac{\left| -\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} x_n + y_m \right|}{\cos \left(\varphi_i - \arctan \left(-\frac{x_m - x_n}{y_m - y_n} \right) \right) \sqrt{\left(\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} \right)^2 + 1}}, \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Для реализации модели выбрана среда моделирования SimInTech, которая в настоящее время является одной из перспективных средств моделирования и разработки робототехнических и иных сложных систем. Для реализации математических выкладок принята структура, представляющая собой совокупность двух модулей, взаимосвязанных между собой через базу сигналов: модуль управ-

ления сканированием и панель управления.

Панель управления представляет собой блок анимации, который содержит три подблока, состоящих из шести примитивов текстового редактора для введения исходных данных, шести примитивов текста для отображения динамически изменяющихся числовых значений пределов областей координат точек, и полярного графика реализуемого прямолинейного движения по заданным координатам (рис. 3).

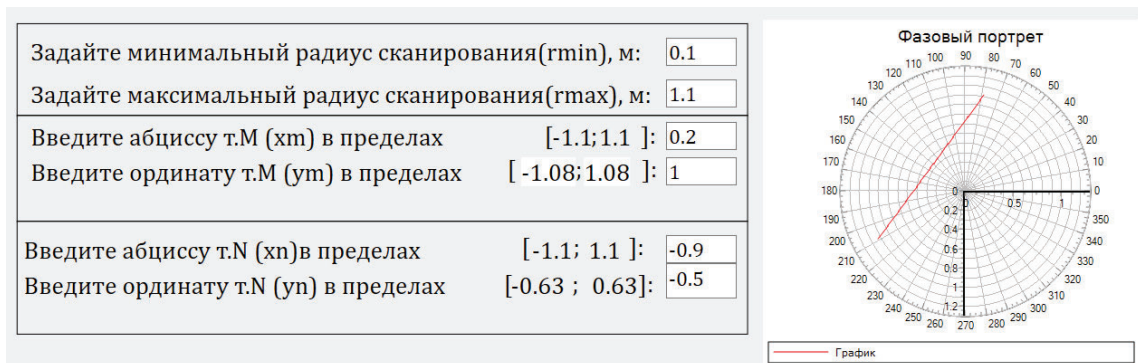


Рис. 3. Панель управления для задания исходных данных

В первом блоке вводятся исходные данные устройства, во втором и третьем – координаты исходных точек в пределах допустимых значений, согласно формулам (2) и (3). При этом допустимые значения координат меняются в режиме реального времени. Если же координата x_i принадлежит области согласно (4), то отображается дополнительный примитив текста, где указывается область согласно (5).

Скрипт, отвечающий за функционирование панели управления посредством вычисления допустимых значений координат отрезка, создан в окне анимации. Модуль управления дви-

жением реализована в схеме модели общего вида. Расчет полярного радиуса реализована с помощью блоков из «Библиотеки блоков» и скрипта в схеме модели общего вида.

В скрипте модели общего вида также реализовано вычисление угла α , полярных углов точек M и N прямой согласно (6) и (7) соответственно в зависимости от положения точек и исключение деления на ноль при нулевых значениях абсцисс точек M и N . Область значений полярных углов от 0 до 2π задана с помощью модельного времени $Time$.

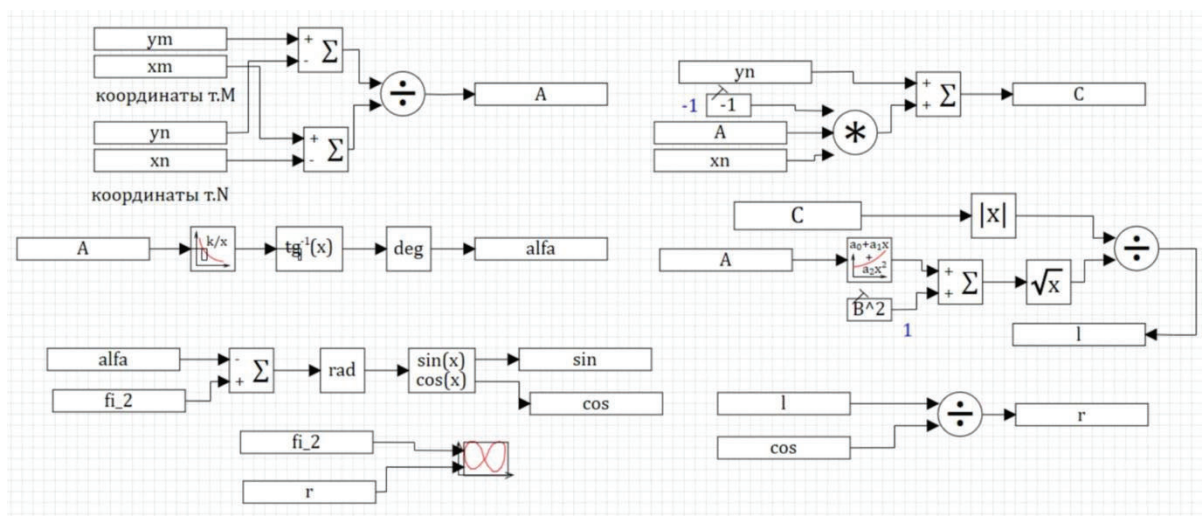


Рис. 4. Схема модели общего вида

Расчет полярного радиуса в зависимости от полярного угла выполнен с помощью блоков на схеме модели общего вида (рис. 4). Основные значения переменных, определяемые по формулам (8) и (9), записываются в базу данных, которая позволяет применять любой сигнал в схеме в другой части, не загромождая при этом проект, а также для синхронного обмена данными между модулями проекта.

Для разработанного мехатронного профилографа, с минимальным максимальным радиусом сканирования $r_{\min} = 0,15$ м, $r_{\max} = 1,20$ м (рис. 5), были получены графики перемещения датчика по прямой при различных положениях исходных координат задаваемых точек. Приведены результаты моделирования перемещения датчика по прямой линии при положениях точек M и N : $\varphi_1 \in [0; \pi/2]$, $\varphi_2 \in [0; \pi/2]$ – рис. 6, а; $\varphi_1 \in [\pi/2; \pi]$, $\varphi_2 \in [\pi; 3\pi/2]$ – рис. 6, б;

$\varphi_1 \in [0; \pi/2]$, $\varphi_2 \in [\pi/2; \pi]$ – рис. 6, в;
 $\varphi_1 \in [0; \pi/2]$, $\varphi_2 \in [3\pi/2; 2\pi]$ – рис. 6, г;
 $\varphi_1 \in [\pi; 3\pi/2]$, $\varphi_2 \in [3\pi/2; 2\pi]$ – рис. 6, д;
 $\varphi_1 \in [\pi/2; \pi]$, $\varphi_2 \in [3\pi/2; 2\pi]$ – рис. 6, е.

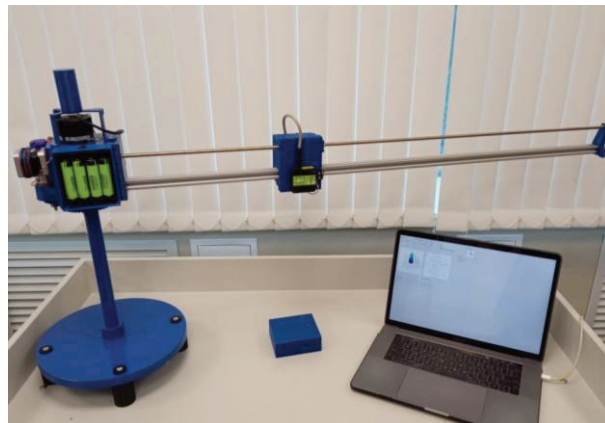


Рис. 5. Внешний вид мехатронного профилографа

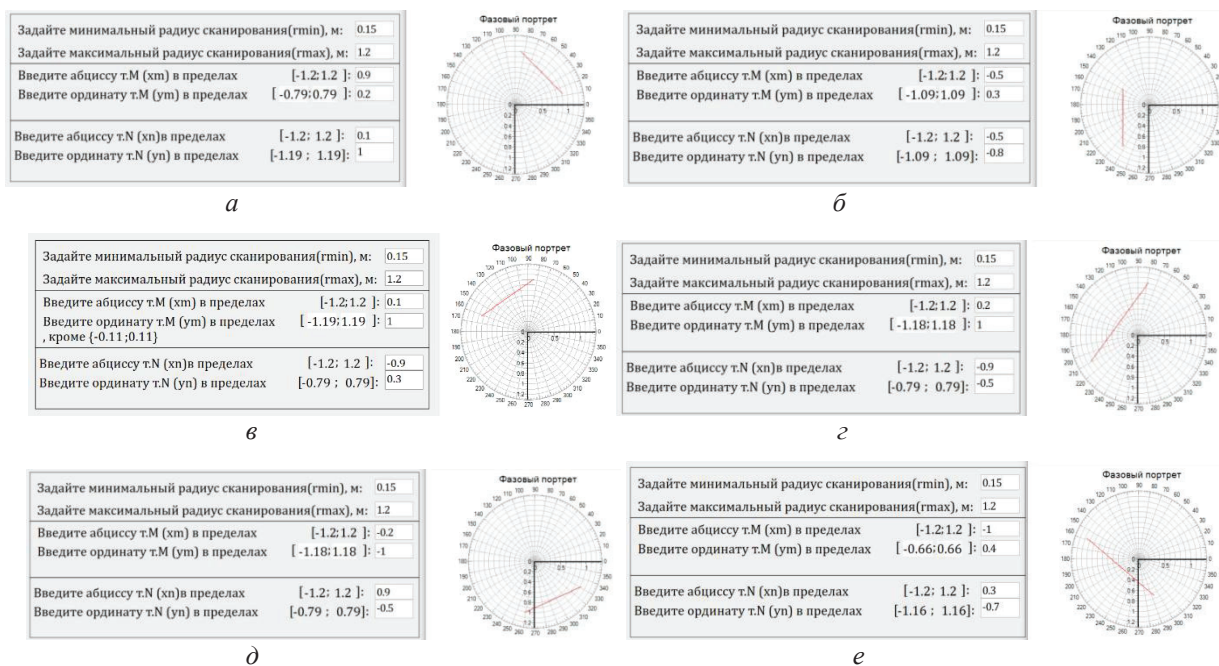


Рис. 6. Результаты моделирования перемещения датчика по прямолинейной траектории с координатами исходных точек:

а – $M(0,9;0,2)$, $N(0,1;1)$; б – $M(-0,5;0,3)$, $N(-0,5;-0,8)$; в – $M(0,1;1)$, $N(-0,9;0,3)$; г – $M(0,2;1)$, $N(-0,9;-0,5)$; д – $M(-0,2;-1)$, $N(0,9;-0,5)$; е – $M(-1,0,4)$, $N(0,3;-0,7)$

Моделирование перемещения датчика по прямолинейной траектории с применением SimInTech подтверждает правильность приведенных математических выкладок и позволяет провести дальнейшую апробацию на реальном объекте с экономией материальных ресурсов и уменьшения количества ошибок, обеспечивая эффективность труда человека.

Выводы

В ходе работы была проведена оптимизация мехатронного профилографа путем отклонения процесса сканирования от штатного режима. В работе приведены математические выкладки, позволяющие сократить время сканирования путем линейного перехода между спиралевидными и круговыми траекториями, тривиальными

ми для разработанного мехатронного профилографа, состоящего из винтового и зубчатого механизмов, синхронизирующих радиальное смещение с вращательным движением. Реализация математических формул выполнена в среде моделирования SimInTech, в которой разработан алгоритм и визуализация сканирования профилографом по заданной прямолинейной траектории в графике с полярным координатами. Моделирование с применением SimInTech позволило проверить правильность проведенных расчетов и позволит уменьшить количество ошибок в дальнейшей апробации на реальном объекте. Апробированные в среде моделирования формулы можно использовать в роботизированных устройствах с аналогичной конструкцией с другими массо-габаритными характеристиками для сканирования объектов по прямолинейной траектории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донсков, А. В. Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата / А. В. Донсков, Н. В. Мишурова, С. В. Соловьев // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 151–160.
2. Марков, А. В. Концепция прецизионных автоматизированных систем контроля датчиков давления как средств метрологического обеспечения летательных аппаратов / А. В. Марков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2018. – № 9–10. – С. 150–154.
3. Юсупов Р. Х. Аналитический обзор роботизированных технологических процессов агропромышленного комплекса / Р. Х. Юсупов, Д. В. Иванов // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – № 8. – С. 63–71.
4. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, А. С. Гудим, М. А. Мельниченко, В. П. Егорова // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2, № 2. – С. 97–104.
5. Федорова, А. А. Обзор роботизированных средств измерения геометрических параметров / А. А. Федорова, И. Н. Иванов, С. А. Васильев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2022. – Т. 9, № 3–4. – С. 35–40.
6. Пат. 2724386 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/24. Мехатронный профилограф / С. А. Васильев, Р. И. Александров, А. А. Федорова [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова». – 2020.
7. Пат. 2770800 С1 Российская Федерация, МПК G01B 5/20, G01B 5/28. Полевой мехатронный профилограф / С. А. Васильев, Р. И. Александров, А. А. Федорова [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова». – 2022.
8. Моделирование технологического процесса в среде визуального моделирования SimInTech / И. Н. Пожаркова, А. В. Чубарь, И. А. Грищенко, Е. Ю. Трояк // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник». – 2018. – № 2. – С. 29–37.
9. Бартенев, В. В. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости / В. В. Бартенев, С. Ф. Яцун, А. С. Аль-Еззи // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 288–293.