

РАДКЕВИЧ А.А., ШИСИНЫ ЯН, ЗАРЕЦКИЙ В.А., ВЕЛЬЧЕНКО А.А., ПАВЛЮКОВЕЦ С.А.

## АНАЛИЗ ВРАЩЕНИЯ ПОВОРОТНЫХ КОЛЁС МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь

*Рассмотрены математические модели управления центрально ориентируемыми и нецентрально ориентируемыми поворотными колёсами мобильного робота. На основании анализа кинематики мобильного робота получены зависимости угла поворота заднего и переднего свободного колеса от угловых скоростей правого и левого дифференциально приводимого ведущего колеса. Для конкретного мобильного робота с определёнными кинематическими параметрами построены графики зависимостей угла поворота свободных колёс от радиуса поворота каждого колеса и графики зависимостей угла поворота свободных колёс от угловых скоростей ведущих колёс. Полученные результаты позволили установить закономерность между углом поворота кастор колёс и конструктивными характеристиками робота. Определённый диапазон угловых скоростей ведущих колёс в соответствии с предельными значениями углов поворота кастор колёс позволяет учитывать полученные математические модели для повышения устойчивости движения мобильного робота.*

**Ключевые слова:** поворотное колесо, мобильный робот, дифференциальный привод, кастор колеса, кинематическая модель, угол поворота, радиус поворота

### Введение

Мобильные роботы, включающие в себя широкий класс устройств автономного передвижения различного назначения, могут использовать в качестве движителей разнообразные типы колёс, которые определяют методы управления ходовой частью робота. Тип применяемого колеса определяется задачами, выполняемыми роботом, и средой его перемещения. Наиболее универсальны в этом плане всенаправленные колёса, однако их особенности, связанные со сложностью конструкции и худшей по сравнению с дифференциально управляемыми фиксированными колёсами устойчивостью [1], создали условия для использования традиционных колёс как альтернативы всенаправленным.

В случае применения колёс традиционного типа возникает вопрос о механизме изменения направления движения робота при отсутствии рулевого управления и жёсткой фиксации колёс, которые обладают только одной степенью подвижности. В двухколёсном роботе поворот корпуса может изменяться путём регулирования скорости и направления вращения приводных колёс. В трёхколёсных и четырёхколёсных роботах, где по технологическим соображениям невозможно использовать только два движителя, обязательно иметь дифференциально приводимые четыре колеса, а достаточно применить два независимо управляемых ведущих колеса, а остальные колёса – поворотные, которые могут менять своё положение относительно корпуса робота.

Поворотные колёса, также именуемые свободно вращающимися, не являются приводными,

а служат лишь для силовой поддержки корпуса робота и изменяют своё положение в результате воздействия приводных колёс. В зависимости от конструктивного исполнения поворотные колёса подразделяются на центрально ориентируемые и нецентрально ориентируемые.

В центрально ориентируемом колесе вертикальная ось, вокруг которой может поворачиваться плоскость ролика, проходит через его центр (рисунок 1). В отличие от этого, нецентрально ориентируемое колесо, известное как кастор колесо, также может изменять своё положение относительно корпуса робота, однако плоскость поворота при этом проходит через вертикальную ось, не пересекающую центр колеса (рисунок 2). За счёт наличия расстояния между вертикальными плоскостями поворота и центра колеса, для описания кинематики кастор колеса требуется большее число параметров, чем для остальных традиционных колёс.

Свободно вращающиеся неприводные поворотные колеса очевидно влияют на управляемость мобильного робота при движении. Математическое описание их поведения при вращении является важной задачей для повышения управления ходовой части робота. Общие уравнения, характеризующие статическое положение поворотных колёс в пространстве, были представлены в статье [2]. Более развёрнутое математическое описание и экспериментальное исследование нелинейной динамики при колебаниях кастор колеса содержится в исследованиях [3], а также в работе [4], где описан общий подход к анализу динамики гибких неголономных систем на примере свободно вращающегося колеса.

Вопросу анализа и оптимизации механической конструкции крепления кастор колеса в ручной тележке посвящена статья [5]. Применительно к мобильным роботам, проблема управления по траектории роботизированной трёхколёсной платформы с учётом возмущающего воздействия, создаваемым отклонением угла поворота свободно вращающегося колеса, подробно рассмотрена в работах [6, 7]. Однако, для исследования планирования движения робота по траектории значимым этапом является анализ взаимного влияния дифференциально приводимых колёс традиционного типа на поворотные колёса и, соответственно, на управляемость мобильным роботом, которые не рассматриваются в данных работах.

Исследование и анализ воздействия вращающихся поворотных колёс на управление движением мобильного робота по заданной траектории является решением проблемы выбора допустимого скоростного диапазона каждого из дифференциальных приводов, направленной на стабилизацию движения робота с традиционными колёсами и уменьшения случайных колебаний при вращении поворотных колёс. Анализ вращения свободных колёс четырёхколёсного мобильного робота определяется целью статьи – установлением взаимосвязи между углами поворота свободных колёс и кинематическими, а также конструктивными параметрами робота.

Для последующего математического описания мобильного робота с поворотными колёсами примем допущения движения роликов по ровной поверхности без проскальзывания, а также пренебрежём влиянием трения на свободное колесо.

### Исследование кинематики мобильного робота с двумя поворотными колёсами

Четырёхколёсный мобильный робот, изображённый на рисунке 1, имеет два поворотных центрально ориентируемых и два приводных традиционных колеса [6]. Стандартные колёса являются ведущими, которые дифференциально приводятся в движение двигателями, а поворотные колёса выполняют только опорную и направляющую функцию.

Положение в пространстве центрально ориентированного поворотного колеса в таком роботе определяется тремя константами: радиус-вектором  $l$ , радиусом колеса  $r$ , углом поворота робота  $\theta$  и одной переменной – углом поворота колеса  $\varphi$  в функции времени:  $\varphi = \varphi(t)$ , а его вращение характеризуется двумя переменными: углом  $\varphi = \varphi(t)$  и угловой скоростью вращения ролика  $\omega = f(t)$  [2].

Во время движения четырёхколёсного мобильного робота поворотное колесо является свободным, так как имеет две степени свободы и может вращаться вокруг оси крепления. В результате изменения состояния движения мобильного робота может произойти поворот свободного колеса, что вызовет возмущения, влияющие на точность управления

движением колёсного мобильного робота [7]. Одним из параметров, количественно определяющим поведение поворотного колеса, является угол поворота  $\varphi$ , который может быть использован в качестве управляемой величины для повышения точности отслеживания траектории движения мобильного робота [8].

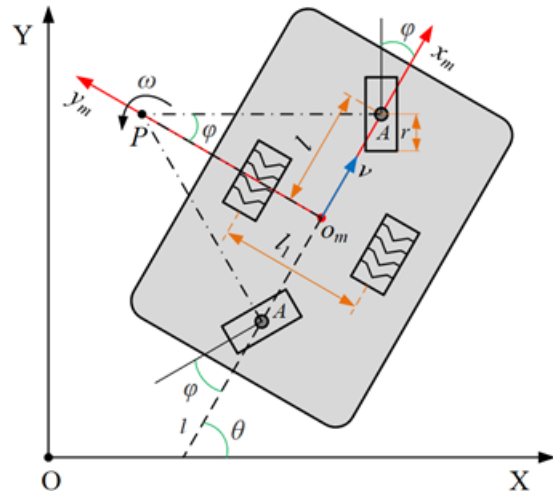


Рисунок 1. Мобильный робот с двумя центрально ориентированными поворотными колёсами

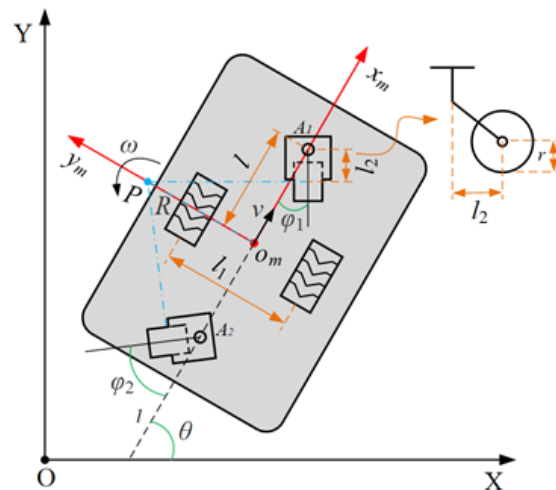


Рисунок 2. Мобильный робот с двумя нецентрально ориентированными поворотными колёсами

Между двумя стандартными колёсами четырёхколёсного мобильного робота может возникать разность скоростей, наличие которой заставляет робот совершать вращательное движение вокруг центра вращения  $P$ . Радиус поворота  $R$  можно выразить как:

$$R = \frac{l_1(\omega_R + \omega_L)}{2(\omega_R - \omega_L)}, \tag{1}$$

где  $R$  – радиус поворота, м;  $l_1$  – расстояние между ведущими колёсами робота, м;  $\omega_L$  – угловая скорость левого ведущего колеса робота, рад/с;  $\omega_R$  – угловая скорость правого ведущего колеса робота, рад/с.

Мобильный робот с двумя традиционными приводными и двумя поворотными нецентрально ориентированными колёсами показан на рисунке 2.

Для описания кинематики нецентрально ориентированного (кастор) колеса используются те же параметры, что и в предыдущем случае, но добавляется расстояние  $l_2$  – плечо между плоскостями поворота и центра колеса. Движение кастор колеса также определяется зависимостями  $\varphi = \varphi(t)$  и  $\omega = f(t)$ .

Радиус поворота  $R$  мобильного робота с кастор колесами можно выразить как:

$$R = \frac{l - (l_2 / \cos \varphi_1)}{\tan \varphi_1}, \quad (2)$$

$$R = \frac{l}{\tan \varphi_2} + \frac{l_2}{\sin \varphi_2}, \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние от точки крепления свободного колеса до геометрического центра робота, м;  $l_2$  – длина плеча свободного колеса, м;  $\varphi_1$  – угол поворота переднего кастор колеса относительно оси  $x_m$ ;  $\varphi_2$  – угол поворота заднего кастор колеса относительно оси  $x_m$ .

Далее рассмотрим диапазон значений  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Очевидно, что при движении мобильного робота по прямой линии кривизна траектории равна 0, поэтому значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  равны 0. На практике, чтобы избежать искажений траектории при движении, длина плеча поворотного колеса должна удовлетворять условию  $0 \leq l_2 < l$ . Как показано на рисунке 1, длина плеча свободного колеса мобильного робота равна 0.

Если учесть, что кривизна траектории движения мобильного робота не равна 0, то радиус поворота  $R > 0$  в соответствии с состоянием движения мобильного робота на рисунке 2. Согласно уравнению (2), диапазон значений  $\varphi_1$  составляет  $\varphi_1 \in (0, \pi/2)$ . Поэтому зависимость между углом поворота кастор колеса  $\varphi_1$  и радиусом поворота  $R$  выражается как:

$$\varphi_1 = \arccos \frac{l \cdot l_2 + \sqrt{R^4 + l^2 R^2 - R^2 l_2^2}}{R^2 + l^2}. \quad (4)$$

Решив уравнение (3), получаем выражение угла поворота  $\varphi_2$  [9]:

$$\varphi_2 = \arccos \frac{-l \cdot l_2 + \sqrt{R^4 + l^2 R^2 - R^2 l_2^2}}{R^2 + l^2}. \quad (5)$$

Если длина плеча поворотного колеса  $l_2 = 0$ , получаем выражение:

$$0 < \frac{-l \cdot l_2 + \sqrt{R^4 + l^2 R^2 - R^2 l_2^2}}{R^2 + l^2} = \frac{R \sqrt{R^2 + l^2}}{R^2 + l^2} < 1. \quad (6)$$

Когда длина плеча  $l_2$  свободного колеса сходится к  $l$ , получается уравнение:

$$\lim_{l_2 \rightarrow l} \frac{-l \cdot l_2 + \sqrt{R^4 + l^2 R^2 - R^2 l_2^2}}{R^2 + l^2} = \frac{-l^2 + R^2}{R^2 + l^2}. \quad (7)$$

Из уравнения (1) видно, что радиус поворота  $R$  связан с угловой скоростью ведущих колёс мобильного робота, поэтому для уравнения (7) необходимо проанализировать случаи  $R \geq l$  и  $R < l$ . Радиус поворота  $R$  совпадает с угловой скоростью ведущих колёс мобильного робота. Следовательно, получаем выражения:

$$0 \leq \lim_{l_2 \rightarrow l} \frac{-l \cdot l_2 + \sqrt{R^4 + l^2 R^2 - R^2 l_2^2}}{R^2 + l^2} < 1, \quad R \geq l; \quad (8)$$

$$-1 < \lim_{l_2 \rightarrow l} \frac{-l \cdot l_2 + \sqrt{R^4 + l^2 R^2 - R^2 l_2^2}}{R^2 + l^2} < 0, \quad R < l.$$

В итоге диапазон значений  $\varphi_2$  можно определить как  $\varphi_2 \in (0, \pi)$ .

Если принять  $\cos \varphi_2 = a$  и  $\cos \varphi_1 = b$ , то разность углов поворота свободных колёс можно выразить как:

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \arccos(ab + \sqrt{(1-a^2)(1-b^2)}). \quad (9)$$

### Построение зависимостей кинематических параметров поворотных колёс

В соответствии с предыдущим анализом и на основе значений параметров мобильного робота, приведенных в таблице 1, была получена более наглядная зависимость между углом поворота свободного колеса и радиусом поворота мобильного робота, представленная на рисунке 3.

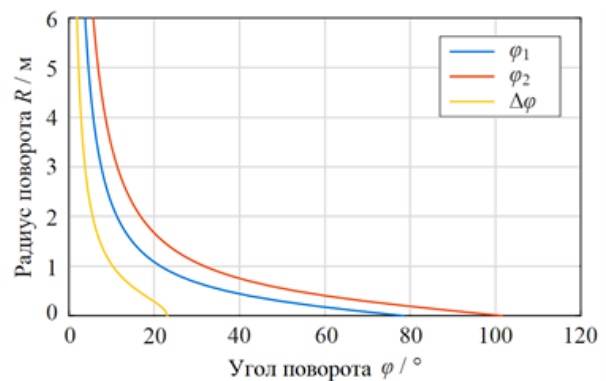


Рисунок 3. Зависимость между углами поворота кастор колёс и радиуса поворота робота

Таблица 1

Параметры четырёхколёсного мобильного робота

Параметры	Значение
Радиус поворота $R$	$(0, 6]$
Скорость правого колеса $\omega_R$	$(0, 20]$
Скорость левого колеса $\omega_L$	$(0, 20]$
Радиус-вектор $l$	0,5
Расстояние между ведущими колёсами $l_1$	0,5
Длина плеча кастор колеса $l_2$	0,1

Для свободных колёс с длиной плеча угол поворота переднего кастор колеса меньше угла поворота заднего кастор колеса, когда они следуют за мобильным роботом по кругу.

Радиус поворота мобильного робота при круговом движении измерить непросто, но угловая

скорость ведущего колеса может быть измерена датчиком угловой скорости, поэтому зависимость между угловыми скоростями ведущих колёс мобильного робота и углом поворота свободного колеса можно получить с помощью уравнений (1), (4) и (5): [10].

$$\phi_1 = \arccos \frac{4l \cdot l_2 (\omega_R - \omega_L)^2 + l_1 (\omega_R + \omega_L) \sqrt{l_1^2 (\omega_R + \omega_L)^2 + 4(\omega_R - \omega_L)^2 (l^2 - l_2^2)}}{l_1^2 (\omega_R + \omega_L)^2 + 4l^2 (\omega_R - \omega_L)^2}, \tag{10}$$

$$\phi_2 = \arccos \frac{-4l \cdot l_2 (\omega_R - \omega_L)^2 + l_1 (\omega_R + \omega_L) \sqrt{l_1^2 (\omega_R + \omega_L)^2 + 4(\omega_R - \omega_L)^2 (l^2 - l_2^2)}}{l_1^2 (\omega_R + \omega_L)^2 + 4l^2 (\omega_R - \omega_L)^2}. \tag{11}$$

Из уравнений (10) и (11) можно получить угол поворота свободного колеса при вращении ведущего колеса мобильного робота с различными угловыми скоростями.

На основании предыдущих уравнений и данных из таблицы 1, построенная зависимость между угловой скоростью ведущего колеса и углом поворота свободного колеса мобильного робота представлена на рисунке 4.

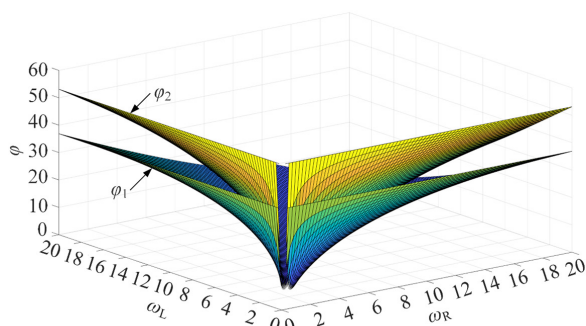


Рисунок 4. Зависимость между угловыми скоростями ведущих колёс и углом поворота свободного колеса мобильного робота

Если угловая скорость левого ведущего колеса больше угловой скорости правого ведущего колеса мобильного робота, то робот совершает обратное вращательное движение, но зависимость между углом поворота кастор колеса и конструктивными параметрами робота, а также кинематическими параметрами остается неизменной.

### Заключение

Полученные зависимости углов поворота свободных колёс от радиуса поворота робота и от угловых скоростей правого и левого колёсных дифференциальных приводов выявляют явную зависимость

между углом поворота свободных колёс и конструктивными и кинематическими параметрами мобильного робота.

Если поворотные колёса мобильного робота имеют определенную длину плеча  $l_2$  (являются нецентрально ориентируемыми), то при совершении вращательного движения зависимости углов вращения от радиуса поворота  $\phi = f(R)$  выражаются разными характеристиками и существует разность углов поворота свободных колёс  $\Delta\phi$ . Зависимость угла поворота свободных колёс в функции угловой скорости приводного колеса  $\phi = f(\omega)$  позволяет в реальном времени получить информацию о текущей угловой скорости ведущего колеса в зависимости от угла поворота кастор колёс. Одновременно можно получить диапазон угловых скоростей ведущих колёс мобильного робота в соответствии с предельным изменением угла вращения свободных колёс. Анализ графиков свидетельствует о том, что с возрастанием угловой скорости приводных колёс увеличивается угол отклонения поворотных колёс относительно осей подвижной системы координат  $(O_m, X_m, Y_m)$ . Полученную зависимость необходимо учитывать при разработке системы управления роботом по траектории и выборе оптимальной скорости маневрирования при сохранении устойчивости конструкции.

При использовании центрально ориентируемых поворотных колёс зависимости углов вращения роликов от радиуса поворота  $\phi = f(R)$  описываются одной и той же характеристикой, а функции угла поворота свободных колёс от угловой скорости ведущих колёс  $\phi = f(\omega)$  определяются одной кривой.

Исходя из этого, применение в колёсных роботах нецентрально ориентированных кастор-колёс обеспечивает лучшую манёвренность робота за счёт разности в углах поворота переднего и заднего роликов, но при этом требует большего числа параметров для описания кинематики их движения.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Павлюковец С.А.** К вопросу управления мобильным роботом с колесами всенаправленного типа / С.А. Павлюковец [и др.] // BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics : сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции, Минск, 17–18 мая 2023 г. : в 2 ч. Ч. 2 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2023. – С. 94-102.
2. **Кампион, Г.** Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов / Г. Кампион, Ж. Бастен, Б. д'Андреа-Новель // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 733-769.
3. **Beregi, S., Takacs, D., Gyebroszki, G.** [et al.] Theoretical and experimental study on the nonlinear dynamics of wheel-shimmy / Sandor Beregi, Denes Takacs, Gergely Gyebroszki, Gabor Stepan // Nonlinear Dynamics 98. – December, 2019. – Pp. 2581-2593.
4. **Schwab A.L., Meijaard J.P.** Dynamics of Flexible Multibody Systems with Non-Holonomic Constraints: A Finite Element Approach / Schwab, Arend L., Jacob P. Meijaard // Multibody System Dynamics 10. – August 2003. – P. 107-123.
5. **Nemade A.** Optimization and Analysis of a Caster Bracket / Amit Nemade // International Journal of Science and Research (IJSR). Vol. 9, Issue 3 (2020). – March 2020. – Pp. 1180-1185.
6. **Shabalina K.** Comparative analysis of mobile robot wheels design / K. Shabalina, A. Sagitov, E. Magid // 2018 11<sup>th</sup> International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), Cambridge, 02–05 September / IEEE. – Cambridge, 2018. – Pp. 175-179.
7. **Tian Zhiyu.** Trajectory Tracking for Wheeled Mobile Robots Considering the Castor Wheel's Torsion Angle Disturbance / Tian Zhiyu, Liu Xiaoping, Wang Gang, Zhao Yunlong, Li Xinghua // Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications. – 2022. – Vol. 45, No. 1. – Pp. 94-101. (in Chinese)
8. **Beniak, R.** Trajectory tracking of a tri-wheel mobile robot using the castor wheel's twist angle / R. Beniak, T. Pyka // 2019 24<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, 26–29 August / IEEE. – Miedzyzdroje, 2019. – Pp. 281-285.
9. **Beniak, R.** Influence of PWM to trajectory accuracy in mobile robot motion / R. Beniak, T. Pyka // Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. – 2012. – Vol. 6, No. 4. – Pp. 50-56.
10. **Капитанюк, Ю.А.** Разработка системы траекторного управления мобильным роботом с роликонесущими колесами / Ю.А. Капитанюк, А.А. Капитонов, С.А. Чепинский // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – №2 (90). – 2014. – 2014. – С. 65-71.

## REFERENCES

1. **Pauliukavets S.A.** [et al.] On the issue of controlling a mobile robot with omnidirectional wheels. BIG DATA and high-level analysis = BIG DATA and Advanced Analytics: collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 17–18, 2023: at 2 p. Part 2. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; editorial board: V.A. Bogush [and others]. Minsk, 2023. Pp. 94-102.
2. **Campion G., Bastin G., D'Andrea-Novel B.** Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. IEEE Transactions on robotics and automation, 1996, vol. 12, no. 1. Pp. 47-62.
3. **Beregi S., Takacs D., Gyebroszki G.** [et al.] Theoretical and experimental study on the nonlinear dynamics of wheel-shimmy. Nonlinear Dynamics 98. 2019. Pp. 2581-2593.
4. **Schwab A.L., Meijaard J.P.** Dynamics of Flexible Multibody Systems with Non-Holonomic Constraints: A Finite Element Approach. Multibody System Dynamics 10. 2003. Pp. 107-123.
5. **Nemade A., Sagitov A., Magid E.** Optimization and Analysis of a Caster Bracket. International Journal of Science and Research (IJSR). Vol. 9, Issue 3. 2020. Pp. 1180-1185.
6. **Shabalina K.** Comparative analysis of mobile robot wheels design. 2018 11<sup>th</sup> International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), Cambridge, 02–05 September 2018. IEEE. Cambridge, 2018. Pp. 175-179.
7. **Tian Zhiyu** [et al.] Trajectory Tracking for Wheeled Mobile Robots Considering the Castor Wheel's Torsion Angle Disturbance. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications. 2022. Vol. 45, No. 1. Pp. 94-101. (in Chinese)
8. **Beniak R., Pyka T.** Trajectory tracking of a tri-wheel mobile robot using the castor wheel's twist angle. 2019 24<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, 26–29 August 2019. IEEE. Miedzyzdroje, 2019. Pp. 281-285.
9. **Beniak R., Pyka T.** Influence of PWM to trajectory accuracy in mobile robot motion. Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. 2012. Vol. 6, No. 4. Pp. 50-56.
10. **Капитанюк, Ю.А.** [et al.] Development of a trajectory control system for a mobile robot with roller-carrying wheels. Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. Vol. 2 (90). 2014. Pp. 65-71. (in Russian)

## ANALYSIS OF CASTOR WHEELS ROTATION OF MOBILE DIFFERENTIAL DRIVE ROBOT

Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

*Mathematical models for controlling centrally oriented and non-centrally oriented rotary wheels of a mobile robot are considered. Based on the analysis of the kinematics of the mobile robot, the dependences of the rotation angle of the rear and front free wheel on the angular velocities of the right and left differentially driven drive wheel were obtained. For a specific mobile robot with certain kinematic parameters, graphs of the dependences of the angle of rotation of the free wheels on the radius of rotation of each wheel and graphs of the dependences of the angle of rotation of the free wheels on the angular velocities of the driving wheels were constructed. The results obtained made it possible to establish a pattern between the angle of rotation of the castor wheels and the design characteristics of the robot. A certain range of angular velocities of the driving wheels in accordance with the limiting values of the castor wheel rotation angles makes it possible to take into account the obtained mathematical models to increase the stability of the movement of the mobile robot.*

**Keywords:** rotary wheel, mobile robot, differential drive, castor wheel, kinematic model, turning angle, turning radius



**Радкевич Артём Андреевич**, магистрант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с применением нейросетевых технологий управления электроприводами в мобильной робототехнике.

**Artsiom A. Radkevich** is a master student of the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to neural network control of electric drives in wheeled mobile robotics.

**E-mail:** eapu@bntu.by, artsiom.a.radkevich@gmail.com



**Ян Шисинь**, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с исследованием алгоритмов управления колесными мобильными роботами.

**Yang Shixin** is a PhD student of the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to developing of control algorithms for wheeled mobile robots.

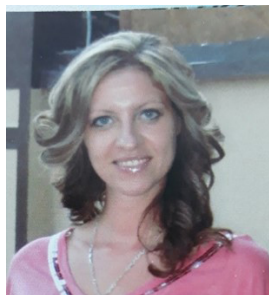
**E-mail:** eapu@bntu.by, yang\_shi\_xin@163.com



**Зарецкий Владимир Александрович**, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов – системы управления движением колесных роботов, безопасность движения роботов, нейросетевая навигация мобильных роботов.

**Uladzimir A. Zaretski** is a PhD student of the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interest includes control systems for wheeled robot motion, safety of robot movement and neural network navigation of mobile robots.

**E-mail:** eapu@bntu.by, strcartun@gmail.com



**Вельченко Анна Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой и исследованием нейросетевых регуляторов для электропривода в мобильной робототехнике и солнечной энергетике.

**Anna A. Velchenko** is a PhD, associate professor, associate professor the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department. The area of scientific interests is related to the development and research of neural network controllers for electric drives in mobile robotics and solar energy.

**E-mail:** eapu@bntu.by, anna.velchenko@gmail.com



**Павлюковец Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов управления мобильными роботами.

**Sjarhei A. Pauliukavets** is a PhD, associate professor, head of the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to the development of methods and algorithms for controlling mobile robots.

**E-mail:** sap@bntu.by, s.pauliukavets@gmail.com