

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123

Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В.Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***E-mail: shabanov_dv@internet.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Для анализа путей повышения скорости движения роботизированной системы без возникновения проскальзывания колес предложен способ вычисления поперечных сил реакций, действующих на колеса. Анализ поперечных сил в дальнейшем позволит синтезировать рациональный алгоритм распределения нагрузки между приводами. Также, в работе предложено использование векторного пространства для представления кинетической энергии, что позволяет упростить вычисления при моделировании перемещения мгновенного центра скоростей и разработке системы управления.

Первая часть статьи посвящена определению зависимостей приведенной силы реакций колес от тяговых усилий приводов; от изменения расстояния до мгновенного центра скоростей; от бокового смещения мгновенного центра скоростей и от текущей скорости движения всей системы. Перечисленные зависимости определены исходя из кинематических ограничений и закона сохранения энергии.

Вторая часть статьи посвящена оценке поперечной силы, действующей на каждое колесо. Для этого используются значение приведенной силы реакций и квазистатическая модель упругого колеса. Показаны примеры применения описанного метода определения поперечных сил: проведено сравнение максимальных возможных скоростей движения без проскальзывания при различном распределении моментов между приводами и при различном расположении приводных колес в системе.

Ключевые слова: колесный робот, мобильный робот, поперечные силы колес, динамическая модель, распределение моментов, многоколесный транспорт.

Введение. Использование автономных мобильных роботов для транспортной системы автоматизированного производства обеспечивает высокую гибкость и отказоустойчивость. Одним из наиболее гибких решений является предложенная ранее концепция транспортной ячейки переменной конфигурации (ТЯПК) [1], отличающаяся использованием однотипных роботов для перемещения грузов любого размера и веса. ТЯПК представляет из себя платформу с грузом, которую тянет по заданной траектории группа двухколесных роботов. Наиболее распространенными подходами к коллективному перемещению груза роботами являются *saging* (окружение груза роботами) [2] и помещение груза непосредственно на роботов [3]. Отличием ТЯПК является то, что груз соединен с роботами через стыковочные узлы, выполняющие функцию оси вращения роботов. Это позволяет совершать сложное движение и эффективно распределять нагрузку между роботами, аналогично известным алгоритмам эффективного распределения моментов в электромобилях [4, 5]. Главным критерием таких алгоритмов является отсутствие проскальзывания колес, возникающее из-за превышения допустимой величины силы трения.

Целью работы является определение величин поперечных сил реакций колес для синтеза алгоритма эффективного распределения момен-

тов между приводами колес и для построения динамической математической модели ТЯПК и других кинематически схожих систем – например, робота, описанного в работах [6, 7]. Математическая модель должна быть сформулирована таким образом, чтобы ускорения всей роботизированной системы определялись по угловой ориентации колес и величинам тяговых сил, создаваемых приводами.

Для упрощения каждый из роботов в ТЯПК представляется как одно приводное колесо, способное вращаться вокруг вертикальной оси, как у робота Лионеля Клавьена [8], а вся ТЯПК в дальнейшем рассматривается как один робот.

В робототехнике задачи оценки сил реакций колес преимущественно рассматриваются для *skid-steering* роботов, имеющих неповорачиваемые приводные колеса [9, 10]. Результаты, полученные в этих работах, неприменимы к ТЯПК, так как *skid-steering* роботы работают с проскальзыванием колес.

Также, оценка поперечных сил реакций колес и создание динамических моделей актуальны для четырехколесного транспорта [11–14], автомобилеподобных роботов [15] и даже при проектировании асфальта посадочных полос самолетов [16, 17]. Однако, в перечисленных работах не учитываются ускорения, возникающие при повороте колес и перемещение мгновенного центра скоростей (МЦС) без изменения расстояния до

него. Более того, большинство работ основаны на моделях Дугоффа [18] и LuGre [19] и оперируют величиной «угол скольжения». Эта величина может использоваться для уточнения, но не для определения поперечных сил реакций колес. Далее величина угла скольжения принимается равной нулю для оценочного определения сил поперечных реакций колес.

$$m \frac{dv}{dt} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{roll} + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{react i} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{react}, \quad (1)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i + \mathbf{M}_{roll} + \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{react i} = \mathbf{T} + \mathbf{M}_{react}, \quad (2)$$

где n – количество приводных колес робота; m – масса робота с грузом; I – приведенный к центру масс момент инерции робота с грузом; \mathbf{v} – линейная скорость робота; ω – угловая скорость робота; \mathbf{r}_i – вектор положения i -го колеса относительно центра масс C ; \mathbf{F}_i – линейная сила, создаваемая приводом i -го колеса; $\mathbf{F}_{react i}$ – поперечная сила реакции i -го колеса; \mathbf{F}_{roll} – приведенная сила сопротивления качению; \mathbf{M}_{roll} – момент относительно центра масс, создаваемый приведенной

Сумма поперечных сил реакций колес. Аналогично методу, описанному в [20], суммарная приведенная сила реакций колес определяется через уравнения статики. Рассматриваются только силы и моменты, действующие в горизонтальной плоскости, величина крена принимается равной нулю. Величины ускорений определяются исходя из закона сохранения энергии и кинематических ограничений.

силой сопротивления качению; \mathbf{F} – приведенная сила, создаваемая приводами и силой сопротивления качению; \mathbf{T} – приведенный момент относительно центра масс, создаваемый приводами и силой сопротивления качению; \mathbf{F}_{react} – приведенная сила, создаваемая силами реакций колес; \mathbf{M}_{react} – приведенный момент, создаваемый силами реакций колес (рис. 1).

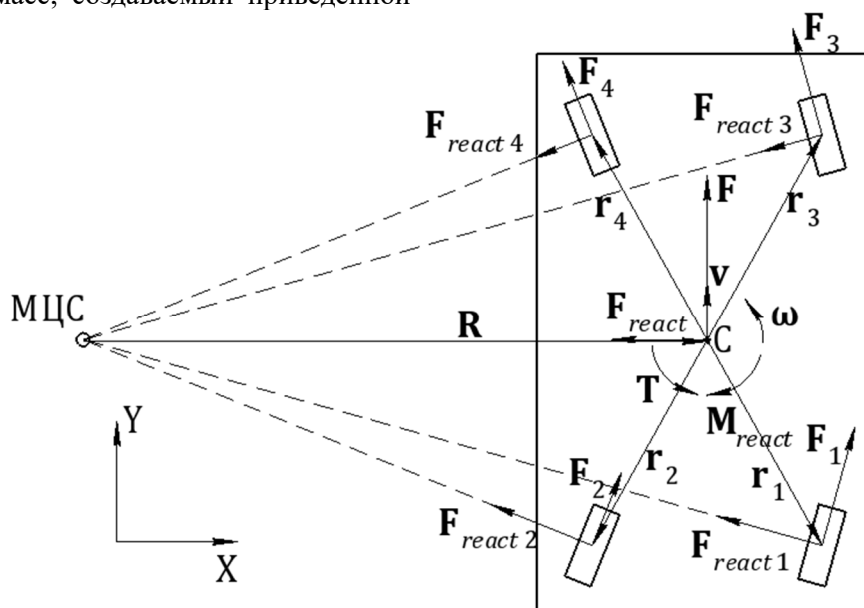


Рис. 1. Векторы сил, моментов и скоростей

Чтобы вычислить величины \mathbf{F}_{react} и \mathbf{M}_{react} , их можно представить как сумму сил и моментов, обеспечивающих соблюдение кинематических ограничений:

$$\mathbf{F}_{react} = \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_d, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{react} = \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_r, \quad (4)$$

где \mathbf{F}_f и \mathbf{M}_f – сила и момент, возникающие от сил тяги \mathbf{F}_i , создаваемых приводами и силы сопротивления качению; \mathbf{F}_c – сила, обеспечивающая центростремительное ускорение; \mathbf{F}_r и \mathbf{M}_r – сила и момент, вызванные изменением расстояния R

от МЦС до центра масс C ; \mathbf{F}_d – сила, вызванная смещением МЦС без изменения расстояния до центра масс.

Сила \mathbf{F}_c является общеизвестной и определяется по формуле:

$$\mathbf{F}_c = -m\omega^2 \mathbf{R}, \quad (5)$$

где \mathbf{R} – вектор от мгновенного центра скоростей до центра масс.

Сила и момент, вызванные силами тяги приводных колес. Исходя из кинематических ограничений, сила \mathbf{F}_f и момент \mathbf{M}_f , создаваемые реакциями колес, должны быть такими, чтобы линейное ускорение робота \mathbf{a} было коллинеарно

вектору скорости \mathbf{v} и было связано с угловым ускорением $\boldsymbol{\varepsilon}$ соотношением $\mathbf{R} \times \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{a}$. При этом величины ускорений определяются как

$$\mathbf{a} = \frac{(\mathbf{F} + \mathbf{F}_f)}{m}; \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{(\mathbf{T} + \mathbf{M}_f)}{I}. \quad (6)$$

Момент, создаваемый приводами колес и силами сопротивления качению, относительно МЦС:

$$\mathbf{T}_{ICR} = \mathbf{R} \times \mathbf{F} + \mathbf{T}. \quad (7)$$

Угловое ускорение робота относительно центра масс равно угловому ускорению относительно МЦС, которое вычисляется через приведенный момент инерции:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\mathbf{T}_{ICR}}{(I + mR^2)}. \quad (8)$$

Из уравнений (6), (7), (8) и соотношения $\mathbf{R} \times \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{a}$ определяются значение \mathbf{M}_f и \mathbf{F}_f :

$$\mathbf{M}_f = \frac{I}{I + mR^2} \mathbf{T}_{ICR} - \mathbf{T};$$

$$\mathbf{F}_f = -\frac{m}{I + mR^2} \mathbf{R} \times \mathbf{T}_{ICR} - \mathbf{F}. \quad (9)$$

Сила и момент, вызванные изменением расстояния до МЦС. Колеса робота могут поворачиваться в процессе движения, изменяя рассто-

яние до мгновенного центра скоростей. Величины \mathbf{F}_r и \mathbf{M}_r должны быть такие, чтобы соблюдались закон сохранения энергии и соотношение $v=R\omega$:

$$\mathbf{F}_r = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}; \mathbf{M}_r = I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}, \quad (10)$$

$$d\left(\frac{mv(t)^2}{2} + \frac{I\omega(t)^2}{2}\right) / dt = 0. \quad (11)$$

Решение этих уравнений зависит от величины dR/dt , которую проблематично вычислить при переходе МЦС через бесконечность. Эта проблема поднималась в работе [21], однако предложенный способ ее решения является весьма трудоемким.

В связи с этим, предлагается представить кинетическую энергию в векторном пространстве. Пусть в трехмерном пространстве имеется вектор \mathbf{E}_{ks} с длиной, равной квадратному корню кинетической энергии (рис. 2). Проекции такого вектора на оси позволяют определить скорости движения системы в направлениях X, Y и скорость вращения системы вокруг оси Z.

$$\mathbf{E}_{ks} = \begin{bmatrix} E_{kx} \\ E_{ky} \\ E_{k\omega} \end{bmatrix}; E_k = E_{ks}^2 = E_{kx}^2 + E_{ky}^2 + E_{k\omega}^2, \quad (12)$$

$$E_{kx} = \sqrt{m/2} \cdot v_x; E_{ky} = \sqrt{m/2} \cdot v_y; E_{k\omega} = \sqrt{I/2} \cdot \omega. \quad (13)$$

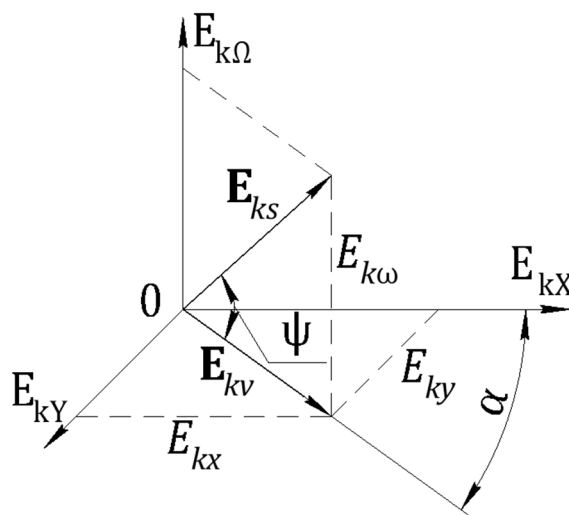


Рис. 2. Представление кинетической энергии в векторном пространстве

Ускорения, сила и момент определяются дифференцированием линейной скорости движения робота, выраженной через угол ψ :

$$\mathbf{F}_r = -m \cdot \mathbf{v} \cdot \text{tg}\psi \cdot \frac{d\psi}{dt}; \mathbf{M}_r = I \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \text{ctg}\psi \cdot \frac{d\psi}{dt}. \quad (14)$$

Сила, вызванная смещением МЦС. Для определения силы \mathbf{F}_d предположим, что колеса

робота поворачиваются таким образом, чтобы сместить мгновенный центр скоростей на угол da за время dt без изменения расстояния R . Тогда, направление вектора скорости \mathbf{v} (рис. 3) и вектора \mathbf{E}_{kv} (рис. 2) также должны повернуться на угол da . Угол da считается малым, поэтому $v(t+dt)=v(t)$. Чтобы перечисленные условия соблюдались, сила F_d должна быть равна:

$$F_d = m \frac{dv}{dt} = mv \frac{d\alpha}{dt};$$

$$F_d = M_{rot} \left(\frac{\pi}{2} \right) mv \frac{d\alpha}{dt}, \quad (15)$$

где M_{rot} – матрица поворота вектора на заданный угол.

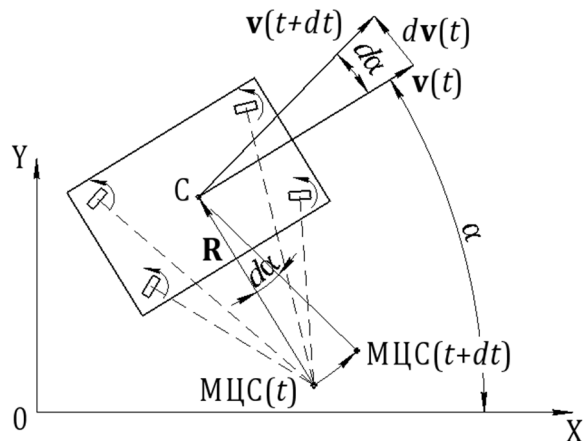


Рис. 3. Изменение направления движения системы

В глобальной системе координат необходимо учитывать скорость вращения робота:

$$F_d = M_{rot} \left(\frac{\pi}{2} \right) mv \left(\frac{d\alpha}{dt} - \omega \right). \quad (16)$$

Поперечные силы реакций каждого колеса. Определение поперечных сил реакций каждого из колес $F_{react i}$ необходимо для исследования движения многоколесных систем. Допускается, что движение происходит без возникновения проскальзывания. В существующих исследованиях поперечных сил реакций колес (например, у Jun Yang [22]) рассматривается транспорт с конкретным, заранее известным расположением колес, что позволяет использовать допущения, применимые только к одному частному случаю. Если количество приводных колес n больше трех, и их расположение произвольное, задача становится статически неопределимой с точки зрения классической механики.

Для транспорта с эластичным покрытием колес (резина, полиуретан и др.) допустимо принимать, что сила поперечной реакции колеса пропорциональна деформации эластичного слоя (рис. 4). Это тождественно закреплению каждого колеса на пружине в поперечном направлении. В дальнейшем система рассматривается в псевдостатическом состоянии.

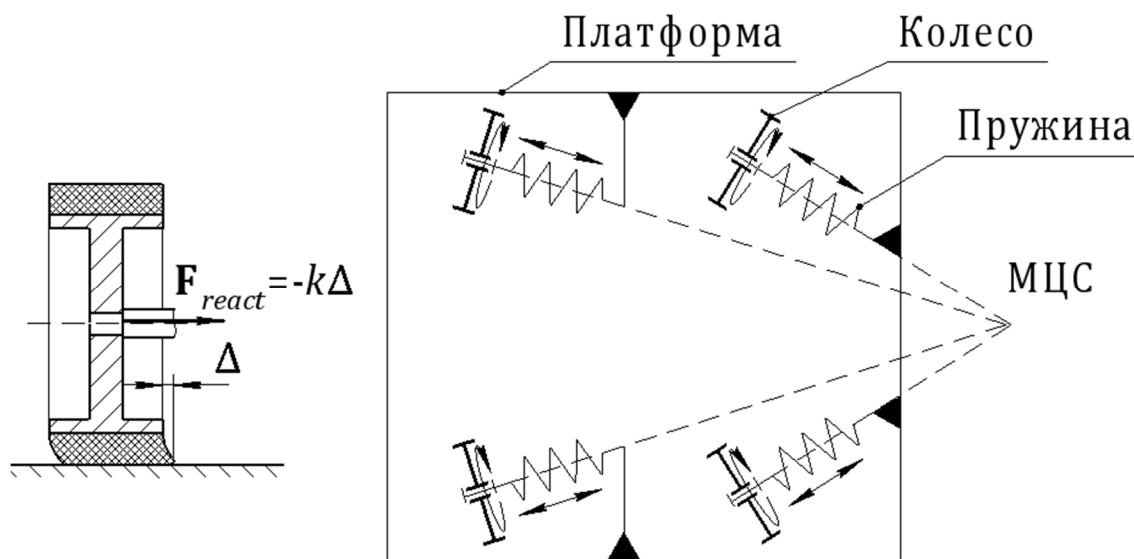


Рис. 4. Модели колеса и робота

Поперечные силы реакций колес вызваны малым смещением робота Δ :

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Геометрически возможно определить проекцию смещения центра колеса на его поперечную ось (рис. 5). Учитывая малость угла дельта фи, получим:

$$\Delta_i = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \quad r_{wXi} \quad r_{wYi}] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 - \cos \Delta \varphi \\ \sin \Delta \varphi \end{bmatrix} = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \quad r_{wYi}] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где r_{wXi} и r_{wYi} – положение центра масс робота в системе координат, связанной с колесом:

$$r_{wXi} = -r_i(\cos\beta_i \cos\alpha_i + \sin\beta_i \sin\alpha_i), \quad (19)$$

$$r_{wYi} = -r_i(\sin\beta_i \cos\alpha_i - \cos\beta_i \sin\alpha_i). \quad (20)$$

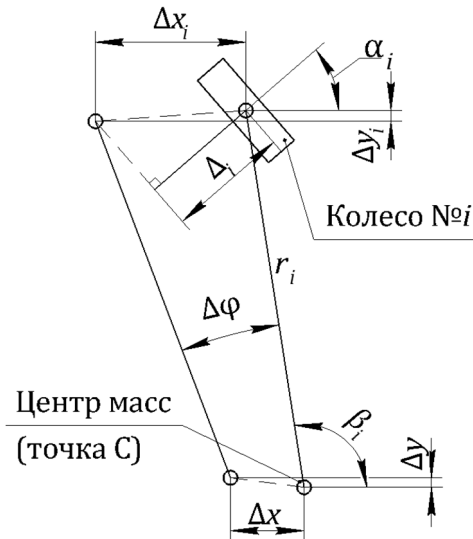


Рис. 5. Геометрические параметры положения и смещения колеса

Вектор силы реакции $\mathbf{F}_{react i}$:

$$\mathbf{F}_{react i} = -k \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \end{bmatrix} \Delta_i. \quad (21)$$

Пусть имеется некий вектор \mathbf{D}_i , включающий в себя силу $\mathbf{F}_{react i}$ и создаваемый ей момент $M_{react i}$. Сумма векторов \mathbf{D}_i будет равна сумме сил и моментов, определенных уравнениями (3), (4).

$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} F_{react i X} \\ F_{react i Y} \\ M_{react i} \end{bmatrix} = -k \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ r_{wYi} \end{bmatrix} \Delta_i, \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{D}_i = \sum_{i=1}^n -k \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ r_{wYi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{react X} \\ F_{react Y} \\ M_{react} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Введем матрицу \mathbf{P} размером $3 \times 3 \times n$, включающую в себя часть выражения (23) с информацией о расположении и ориентации колес. Матрица $k\Delta$ и силы поперечных реакций каждого колеса определяются из выражений (25) и (26) соответственно.

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ r_{wYi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & r_{wYi} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$\mathbf{P} \cdot (k\Delta) = - \begin{bmatrix} F_{react X} \\ F_{react Y} \\ M_{react} \end{bmatrix}; \quad k\Delta = -\mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} F_{react X} \\ F_{react Y} \\ M_{react} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\mathbf{D}_i = -\mathbf{P}_i \cdot (k\Delta). \quad (26)$$

Если определитель матрицы \mathbf{P} близок к нулю, значение $k\Delta$ возможно приближенно вычислить с помощью алгоритмов поиска локального минимума. В качестве начального значения

для поиска берется предыдущее вычисленное значение $k\Delta$.

Применение метода определения поперечных сил реакций колес. Предложенный метод возможно использовать для определения оптимальной ориентации робота при движении по траектории или сравнения эффективности алгоритмов распределения нагрузки между приводами. Для симуляции использовалась динамическая математическая модель, построенная на основе выражений (1), (2), (3), (4) и модель системы управления, описанная в [1]. Колеса расставлены по углам прямоугольника размером 3м × 1м. Во избежание резких изменений скоростей и ускорений траектория задана сплайном Безье 4го порядка.

Масса робота с грузом $m=1000$ кг; момент инерции робота с грузом $I=1000$ кг·м²; приведенная сила сопротивления качению $F_{roll}=200$ Н.

В среде Simulink проанализированы четыре варианта движения по траектории: ориентация А - с начальным угловым положением 0° (рис. 6, а),

ориентация Б - с начальным угловым положением 90° (рис. 6, б) и с двумя различными принципами распределения нагрузки между приводами. В первом случае нагрузка равномерно, во втором - исходя из кинематики движения, когда

каждый привод стремится поддерживать заданную скорость вращения колеса с помощью П-регулятора:

$$F_i = k_p(v_i - v_i^*) = k_p r_i (\omega - \omega^*) . \quad (27)$$

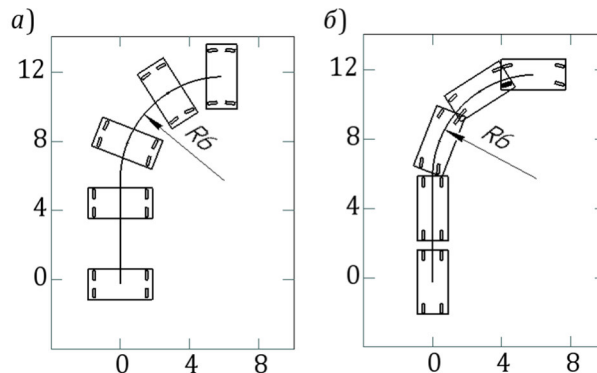


Рис. 6. Траектория движения:

а) с начальным угловым положением 0° ; б) с начальным угловым положением 90°

Варианты движения сравниваются по критерию максимальной возможной скорости движения без потери сцепления между колесом и полом. Сила трения каждого колеса $F_{fr\ i}$ является суммой поперечной силы $F_{react\ i}$ и силы F_i , создаваемой приводом. Итерационно определяется такая скорость движения робота, при которой сила трения любого колеса не превысит 122Н. При равномерном распределении нагрузки между приводами максимальные скорости движения составляют 1,16 м/с для ориентации А и 1,43 м/с для ориентации Б. При распределении по кинематическому

принципу – 1,28 м/с и 1,36 м/с соответственно. Для примера на рисунке 7 приведены графики поперечных сил и сил трения при ориентации А. Скачок сил реакций колес 1 и 2 вызван быстрым поворотом колес для перехода от прямолинейного движения к движению по дуге.

Различие между максимальными скоростями самого эффективного варианта движения (ориентация Б и равномерное распределение нагрузки) и самого неэффективного (ориентация А и равномерное распределение нагрузки) составляет 23 %. Такое различие значительно для автоматизированных транспортных систем.

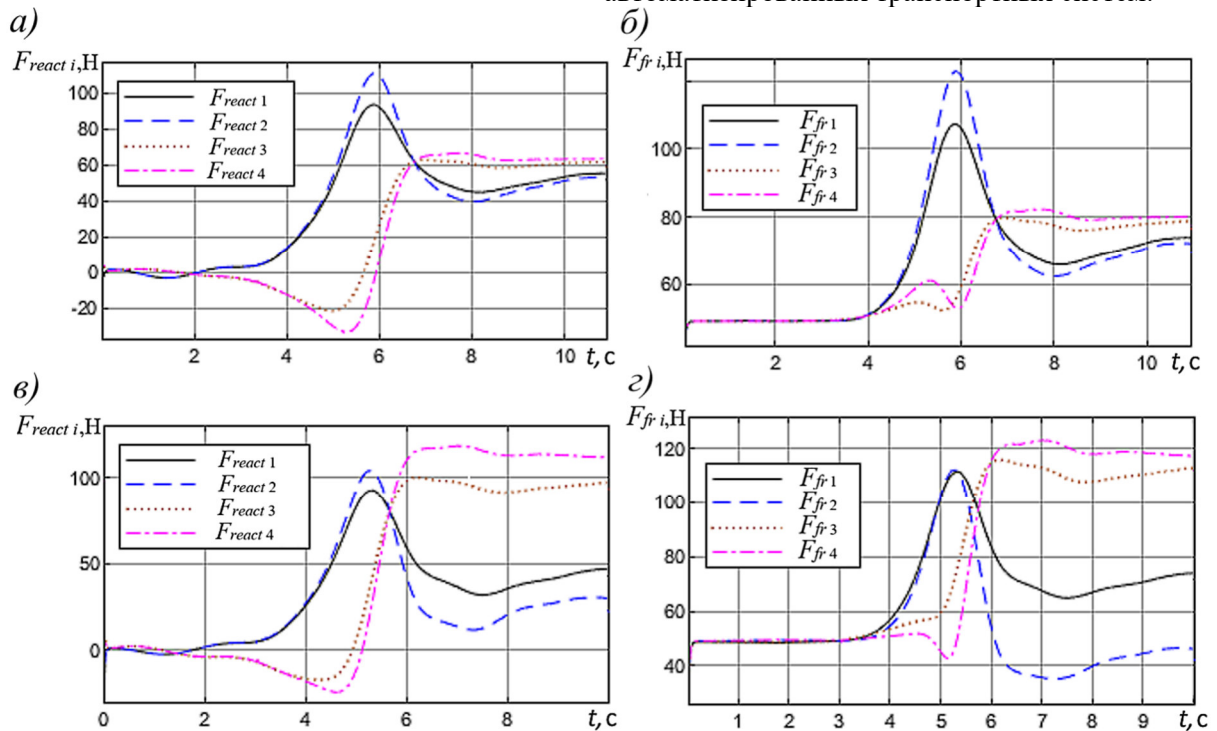


Рис. 7. Результаты симуляции для ориентации А: а – поперечные силы, при равномерном распределении; б – силы трения между колесами и полом, при равномерном распределении; в – поперечные силы, при кинематическом распределении; г – силы трения между колесами и полом, при кинематическом распределении

Также, описанный метод определения поперечных сил, действующих на колеса, в перспективе может быть использован для синтеза оптимального алгоритма распределения нагрузки между приводами.

Заключение. Метод определения поперечных реакций колес может быть использован для увеличения скорости движения многоколесных систем посредством синтеза рационального алгоритма распределения тяговых усилий между приводами колес. Также, он позволит проводить сравнение роботов с различным расположением приводных колес и сравнение траекторий и законов изменения углового положения системы по критериям пиковых величин поперечных сил и отсутствия проскальзывания. Известные зависимости сил поперечных реакций и скоростей поперечного смещения колес, такие как модель Дугоффа и другие, оперирующие углом скольжения колеса, могут быть использованы для получения более точных результатов.

Использованная в работе формализация векторного пространства для представления кинетической энергии позволит упростить создание систем управления и моделей, оперирующих положением мгновенного центра скоростей.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации программы «Приоритет 2030», стратегический проект «Человекоцентричные технологии и решения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects // International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843. 017.
2. Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J., Habibi G., McLurkin J., Nagpal R. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments // Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2013. Pp. 47–54.
3. Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Цупа А.Е. Координированное управление группой роботов в задачах перемещения груза // Вычислительные технологии. 2016. Том 21. №1. С. 70–79.
4. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. // Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI: 10.3390/en8088537.
5. Kunjunni B., Zakaria M.A.B., Majeed A.P., Nasir A.F., Peeie M.H.B., Abdul Hamid U.Z. Effect of load distribution on longitudinal and lateral forces acting on each wheel of a compact electric vehicle // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. No. 2. Pp. 1–8. DOI: 10.1007/s42452-020-1996-9.
6. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot // International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp. 130–140. DOI: 10.1007/978-3-642-27272-1_12.
7. Dziomin U., Kabysch A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot // IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867–873. DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6663051.
8. Clavien L., Lauria M., Michaud F. Instantaneous centre of rotation estimation of an omnidirectional mobile robot // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA. 2010. Pp. 5435–5440. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509754.
9. Zhang H., Liang H., Tao X., Ding Y., Yu B., Bai R. Driving force distribution and control for maneuverability and stability of a 6WD skid-steering EUGV with independent drive motors // Applied Sciences. 2021. Vol. 961. No. 11. 11030961. DOI: 10.3390/app11030961.
10. Wang T., Wu Y., Liang J., Han C., Chen J., Zhao Q. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor // Sensors. 2015. Vol. 15. Pp. 9681–9702. DOI: 10.3390/s150509681.
11. Pusca R., Ait-Amirat Y., Berthon A., Kauffmann J. M. Modeling and simulation of a traction control algorithm for an electric vehicle with four separate wheel drives // Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference. 2002. Vol. 56. No. 3. Pp. 1671–1675. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040500.
12. Dakhllallah J., Glaser S., Mammari S., Sebsadji Y. Tire-road forces estimation using extended kalman filter and sideslip angle evaluation // 2008 American Control Conference. 2008. Pp. 4597–4602. DOI: 10.1109/ACC.2008.4587220.
13. Doumiati M., Victorino A., Charara A., Lechner D. A method to estimate the lateral tire force and the sideslip angle of a vehicle: Experimental validation // 2010 American Control Conference. 2010. Pp. 6936–6942. DOI: 10.1109/ACC.2010.5531319.
14. Hashemi E., Pirani M., Khajepour A., Kasaiezadeh A. A comprehensive study on the stability analysis of vehicle dynamics with pure/combined slip tire models // Vehicle System Dynamics. 2016. Vol. 54. No. 12. Pp. 1736–1761. DOI: 10.1080/00423114.2016.1232417.
15. Khan H., Iqbal J., Baizid K., Zielinska T. Longitudinal and lateral slip control of autonomous

wheeled mobile robot for trajectory tracking // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2015. Vol. 16. No. 2. Pp. 166–172. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.

16. You Q., Zhang H., Ma J. Calculation of the Lateral Forces Caused by B777 Turning during Taxiing // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2019. Vol. 145. No. 1. 04018067. DOI:10.1061/JPEODX.0000092.

17. You Q., Zhang H., Ma J. Evaluation of the lateral loading caused by aircraft with complex gear configurations turning during taxiing // International Journal of Pavement Engineering. 2019. Vol. 20. No. 8. Pp. 911–919. DOI: 10.1080/10298436.2017.1366763.

18. Dugoff H., Fancher P.S., Segel L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance // International Automobile Safety Conference. 1970. Pp. 1219–1243. DOI: 10.4271/700377.

19. De Wit C.C., Tsiotras P. Dynamic tire friction models for vehicle traction control // Proceedings of the 38th IEEE conference on decision and control (Cat. no. 99CH36304). 1999. Vol. 4. Pp. 3746–3751. DOI:10.1109/CDC.1999.827937.

20. Xu F.X., Liu X.H., Chen W., Zhou C., Cao B.W. Improving handling stability performance of four-wheel steering vehicle based on the H₂/H_∞ robust control // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 5. 895. DOI: 10.3390/app9050857.

21. Sorour M., Cherubini A., Khelloufi A., Passama R., Fraise P. Complementary-route based ICR control for steerable wheeled mobile robots // Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 118. Pp. 131–143. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.

22. Yang J., Chen W., Wang Y. Estimate lateral tire force based on yaw moment without using tire model // International Scholarly Research Notices. 2014. Art. No. 934181. DOI: 10.1155/2014/934181.

Информация об авторах

Шабанов Дмитрий Вячеславович, ассистент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Волков Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: volkov-and@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Чеусова Анна Ивановна, ассистент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: cheusova.annet@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Кочнева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: kov_mirny@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

Поступила 29.08.2022 г.

© Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В., 2022

***Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V.**

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**E-mail: shabanov_dv@internet.ru*

ESTIMATING THE LATERAL FORCES THAT IMPACT ON THE WHEELS OF A TRANSPORT ROBOTIC SYSTEM

Abstract. *A method for calculating the wheels lateral forces is proposed to analyze ways to increase the speed of the robotic system without wheel slippage appearance. The analysis of lateral forces allows to synthesize a rational algorithm for distributing the load between drives. In addition, it is proposed to use a vector space to represent kinematic energy, which simplify simulation of the instant center of rotation movements and simplify control system development. The first part of the article is devoted to finding the relationship between the summary lateral force and the drives traction forces; the changing the distance to the instant center of rotation; the lateral movement of the instant center of rotation and the current speed of the entire system. The listed relationships are found through kinematic constraints and the energy conservation law. The second part is devoted to the evaluation of the lateral force acting on each wheel. Thus, the value of the reduced reaction force and the quasi-static model of an elastic wheel are used. Examples of using the proposed method are shown: a comparison of the maximum possible speeds of motion without slippage for different distribution of*

moments between drives and for different arrangement of drive wheels in the system is carried out.

Keywords: wheeled robot, mobile robot, lateral wheel force, dynamic model, torque distribution, multi-wheel vehicle.

REFERENCES

1. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects. International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843.
2. Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J., Habibi G., McLurkin J., Nagpal R. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments. Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2013. Pp. 47–54.
3. Zolotukhin I.U.N., Kotov K.Iu., Maltsev A.S., Nesterov A.A., Sobolev M.A., TSupa A.E. Coordinated control of a group of robots in the moving cargo tasks [Koordinirovannoe upravlenie gruppoj robotov v zadachah peremeshcheniya gruzha], Vychislitel'nye Tekhnologii. 2016. Vol. 21. No. 1. Pp. 70–79 (rus).
4. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI: 10.3390/en8088537.
5. Kunjuni B., Zakaria M. A. B., Majeed A. P., A Nasir A. F., Peeie M. H. B., Abdul Hamid U. Z. Effect of load distribution on longitudinal and lateral forces acting on each wheel of a compact electric vehicle. SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. No. 2. Pp. 1–8. DOI: 10.1007/s42452-020-1996-9.
6. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot. International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp.130–140. DOI: 10.1007/978-3-642-27272-1_12.
7. Dziomin U., Kabysch A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot. IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867–873. DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6663051.
8. Clavien L., Lauria M., Michaud F. Instantaneous centre of rotation estimation of an omnidirectional mobile robot. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA. 2010. Pp. 5435–5440. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509754.
9. Zhang H., Liang H., Tao X., Ding Y., Yu B., Bai R. Driving force distribution and control for maneuverability and stability of a 6WD skid-steering EUGV with independent drive motors. Applied Sciences. 2021. Vol. 961. No. 11. 11030961. DOI: 10.3390/app11030961.
10. Wang T., Wu Y., Liang J., Han C., Chen J., Zhao Q. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor. Sensors. 2015. Vol. 15. Pp. 9681–9702. DOI: 10.3390/s150509681.
11. Pusca R., Ait-Amirat Y., Berthon A., Kauffmann J. M. Modeling and simulation of a traction control algorithm for an electric vehicle with four separate wheel drives. Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference. 2002. Vol. 56. No. 3. Pp. 1671–1675. DOI: 10.1109/VETECONF.2002.1040500.
12. Dakhlallah J., Glaser S., Mammari S., Sebsadji Y. Tire-road forces estimation using extended kalman filter and sideslip angle evaluation. 2008 American Control Conference. 2008. Pp. 4597–4602. DOI: 10.1109/ACC.2008.4587220.
13. Doumiati M., Victorino A., Charara A., Lechner D. A method to estimate the lateral tire force and the sideslip angle of a vehicle: Experimental validation. 2010 American Control Conference. 2010. Pp. 6936–6942. DOI: 10.1109/ACC.2010.5531319.
14. Hashemi E., Pirani M., Khajepour A., Kasaiezadeh A. A comprehensive study on the stability analysis of vehicle dynamics with pure/combined slip tire models. Vehicle System Dynamics. 2016. Vol. 54. No. 12. Pp. 1736–1761. DOI: 10.1080/00423114.2016.1232417.
15. Khan H., Iqbal J., Baizid K., Zielinska T. Longitudinal and lateral slip control of autonomous wheeled mobile robot for trajectory tracking. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2015. Vol. 16. No. 2. Pp. 166–172. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.
16. You Q., Zhang H., Ma J. Calculation of the Lateral Forces Caused by B777 Turning during Taxiing. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2019. Vol. 145. No. 1. 04018067. DOI:10.1061/JPEODX.0000092.
17. You Q., Zhang H., Ma J. Evaluation of the lateral loading caused by aircraft with complex gear configurations turning during taxiing. International Journal of Pavement Engineering. 2019. Vol. 20. No. 8. Pp. 91–919. DOI: 10.1080/10298436.2017.1366763.
18. Dugoff H., Fancher P.S., Segel L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance. International Automobile Safety Conference. 1970. Pp. 1219–1243. DOI: 10.4271/700377.

19. De Wit C. C., Tsiotras P. Dynamic tire friction models for vehicle traction control. Proceedings of the 38th IEEE conference on decision and control (Cat. no. 99CH36304). 1999. Vol. 4. Pp. 3746–3751. DOI:10.1109/CDC.1999.827937.

20. Xu F.X., Liu X.H., Chen W., Zhou C., Cao B.W. Improving handling stability performance of four-wheel steering vehicle based on the H₂/H_∞ robust control. Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 5. 895. DOI: 10.3390/app9050857.

21. Sorour M., Cherubini A., Khelloufi A., Passama R., Fraisse P. Complementary-route based ICR control for steerable wheeled mobile robots. Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 118. Pp. 131–143. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.

22. Yang J., Chen W., Wang Y. Estimate lateral tire force based on yaw moment without using tire model. International Scholarly Research Notices. 2014. 934181. DOI: 10.1155/2014/934181.

Information about the authors

Shabanov, Dmitrii V. Teaching assistant. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Volkov, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: volkov-and@yandex.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Cheusova, Anna I. Teaching assistant. E-mail: cheusova.annet@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Kochneva, Olga V. PhD, Assistant professor. E-mail: kov_mirny@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Received 29.08.2022

Для цитирования:

Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В. Определение поперечных сил, действующих на колеса транспортной роботизированной системы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123

For citation:

Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V. Estimating the lateral forces that impact on the wheels of a transport robotic system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123