

УДК 681.5

**OMNI-КОЛЕСА КАК СПОСОБ
РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ
НЕЛИНЕЙНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА И
ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В МАЛЫХ
МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМАХ**

Лапшин В. П., Коба Я. Д., Абалов А. А.

Донской государственной технической
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

i090206.lapshin@yandex.ru

488369@mail.ru

abal.26rus@yandex.ru

Пневматические колеса, широко используемые в автомобильной технике для решения ряда задач по транспортировке людей и грузов, получили распространение в новой, бурно развивающейся области колесного транспорта — мобильной робототехнике. В эту область они привнесли как свои достоинства, так и недостатки.

Приводится подробный анализ особенностей использования пневматических колес для малых мобильных платформ, делается вывод о перспективах их применения. В виде способа устранения недостатков пневматического колеса в качестве движителя предложено использовать новое инновационное колесо, получившее название omni-колесо. Приведен пример удачного синтеза мобильной платформы на этих колесах и сделан вывод об эффективности замены в мобильной робототехнике пневматической колесной парадигмы на omni-колеса.

Ключевые слова: omni-колеса, колесный движитель, мобильная платформа, потери при движении, тяговая характеристика.

Введение. Пневматические колеса, широко используемые в автомобильной технике для решения ряда задач по транспортировке людей и грузов, получили распространение в новой, бурно развивающейся области колесного транспорта — мобильной робототехнике [1–5]. Надо отметить, что колесо в качестве движителя механизированного транспорта вначале применили в железнодорожной технике, и только в XX веке появились пневматические колеса, широко используемые сегодня в автомобильной технике [1, 2–5]. Однако они не вытеснили стальное колесо и рельс полностью, это связано с тем фактом, что потери при движении в железнодорожном транспорте

UDC 681.5

**OMNI WHEELS AS THE WAY TO SOLVE
THE PROBLEM OF NON-LINEAR
INTERACTION OF THE WHEEL AND
THE BEARING AREA IN SMALL MOBILE
PLATFORMS**

Lapshin V. P., Koba Y. D., Abalov A. A.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

i090206.lapshin@yandex.ru

488369@mail.ru

abal.26rus@yandex.ru

Pneumatic wheels which are widely used in automotive vehicles for the solution of a number of tasks of transportation of people and freights gained distribution in a new, rapidly developing area of wheel transport – mobile robotics. They introduced both advantages and disadvantages to this area.

The paper provides the detailed analysis of features of use of pneumatic wheels for small mobile platforms as well as the conclusion about the prospects of their application. As a way to eliminate the shortcomings of a pneumatic wheel as a propulsion unit it is offered to use the new innovative wheel which received the name omni-wheel. An example of a successful creation of a mobile platform on these wheels is given in the article and the conclusion is drawn on the effectiveness of replacement of pneumatic wheel paradigm by omni-wheels in mobile robotics.

Keywords: omni-wheel, wheel propulsion unit, mobile platform, losses when driving, traction characteristic.

меньше, чем в автомобильном [1–5]. Особенности формирования контакта колеса и опорной поверхности и возникающие при этом эффекты определили устойчивое разделение железнодорожного и автомобильного транспорта [6–9]. Несмотря на попытки совмещать подходы к синтезу систем управления движением через внедрение новых подходов к описанию процессов, протекающих в контакте колеса с поверхностью дороги, полного доминирования пневматической парадигмы сегодня не наблюдается [10].

В XXI веке бурно развивается новая область применения колес — область мобильной робототехники. Здесь, в этой области, соперничество между железнодорожным и автомобильным подходом отходит в прошлое, так как требуются новые решения, не связанные с ранее полученными. Одним из перспективных, по мнению авторов, подходов, является использование *omni*-колеса как движителя мобильных платформ, не несущих большой нагрузки [11–12].

Цель данной работы — проанализировать особенности использования пневматических колес для малых мобильных платформ и сделать вывод о перспективах их применения.

Проблематика пневматического колеса движителя малых мобильных платформ. Одной из главных особенностей взаимодействия колесной мобильной платформы с окружающей средой является то, что это взаимодействие, за исключением влияния аэродинамических потерь, происходит на сравнительно небольшой площадке, образованной между нагруженными радиальной силой пневматическими колесами платформы и опорой. Указанная площадка контакта (пятно контакта) имеет различные формы [3–5, 10].

При движении мобильной платформы возникает ряд эффектов, приводящих к трансформации пятна контакта, один из них — явление проскальзывания (рис. 1).

После приложения момента силы к колесу, находящемуся в сцеплении с опорой, в пятне контакта возникают тангенциальные деформации, которые в первой зоне приводят к сжатию и уплотнению волокон колеса, и в эту зону начинает входить та часть колеса, которая еще не была в контакте с опорой, во второй зоне происходят деформационные смещения контактирующих поверхностей, что приводит к росту касательных напряжений и, как следствие, возникновению сил трения, а в третьей зоне материал колеса растягивается под действием приложенного момента силы и начинает выходить из пятна контакта. Результатом этого процесса является возникновение явления проскальзывания колеса относительно поверхности дороги. Отметим, что с увеличением тангенциальной нагрузки, приложенной к колесу, вторая зона будет уменьшаться, а в случае превышения некоторого критического значения возможен переход колеса в режим буксования.

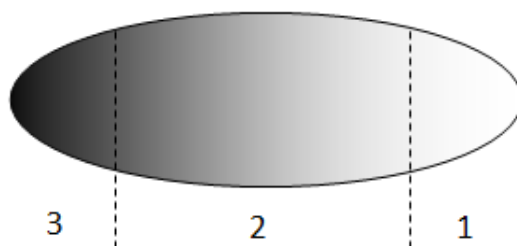


Рис. 1. Схема, поясняющая изменения в пятне контакта между колесом и опорой в динамическом режиме: 1 — зона чистого качения, 2 — зона сцепления, 3 — зона максимального трения и начала формирования нового контакта

В условиях движения мобильной платформы реальная угловая величина сектора колеса, принимающего участие в контакте (θ), будет отлична от значения, которому она была равна в статическом режиме. Это связано с тем, что деформация колеса в нормальной плоскости не происходит мгновенно, а в условиях движения, за исключением случая блокировки колес при торможении

нии, время на радиальные деформации ограничено скоростью вращения колеса, иными словами, чем выше эта скорость, тем меньше времени на деформационные процессы в колесе.

Природа трения покоя, которое в контакте колеса и дороги является сцеплением, и трения скольжения достаточно хорошо изучена для колесного транспорта [1–2, 4, 6–7]. В самом общем случае контакт колеса и поверхности дороги может быть представлен как взаимопроникновение двух поверхностей — контактной поверхности колеса и контактной поверхности. При этом обе поверхности имеют сложный микрорельеф, то есть в рамках пятна контакта площадь реального взаимодействия поверхностей будет меньше, чем площадь пятна контакта. В рамках пятна контакта образуются дискретные зоны, в которых и будет возникать тангенциальная сила, препятствующая относительно движению контактирующих поверхностей.

В условиях движения мобильной платформы пятно контакта будет непрерывно формироваться и также непрерывно разрушаться, это связано с тем, что процессы, происходящие в контакте колеса и поверхности, протекают одновременно с другими процессами, в том числе одновременно с вращением ведущего или ведомого колеса. Момент, препятствующий вращению колеса, формируется непрерывно, то есть вне зависимости от степени взаимопроникновения колеса и дороги и степени сформированности контакта, что позволяет говорить о различных видах трения, реализуемого в контакте колеса и поверхности дороги.

Как известно, на фактической площадке контакта различают четыре вида трения: сухое, граничное, гидродинамическое (жидкостное) и смешанное (одновременно имеются элементы сухого, граничного и гидродинамического трения). В случае сухого трения в контакте будут находиться несмазанные поверхности колеса и дороги, однако они будут покрыты окисными пленками и тонким слоем молекул газов и воды, адсорбированными из окружающей среды. Для второго случая характерно вместе с уже перечисленными пленками присутствие молекул смазочных материалов, которые представлены также тонким слоем, прочно связанным либо с колесом, либо с дорогой. Для третьего случая характерно наличие жидкости между колесом и дорогой, которая будет полностью разделять контактирующие поверхности [7]. Необходимо отметить, что в механике также различают коэффициенты трения покоя (статический) и скольжения (кинетический). В реальных случаях трения суммарная характеристика может быть близка к виду, представленному на рис.2 [1, 8–10].

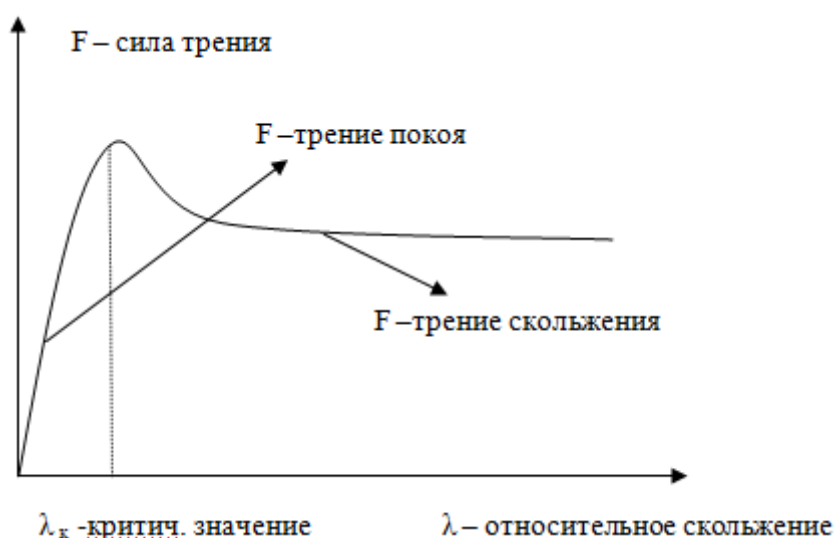


Рис.2. Зависимость силы трения от относительного скольжения контактирующих поверхностей

Представленная на рис. 2 характеристика трения носит самый общий характер, но вместе с тем она достаточно хорошо иллюстрирует процессы, происходящие в контакте взаимодействующих поверхностей. Эта характеристика может быть объяснена следующим образом: если к двум контактирующим телам, контакт которых обусловлен некоторой приложенной прижимающей силой, приложить в тангенциальном направлении другую силу, то начнется относительное движение этих тел, которое на рис. 2 обозначено как λ , результатом этого процесса будет возникновение силы, противодействующей такому движению. В начальный момент времени это противодействие и это движение будут происходить в пределах упругих изменений в контакте до момента времени, пока относительное перемещение не превысит критического значения ($\lambda_{к}$ критич. значение), значение тангенциальной силы в этой точке принято называть силой трения покоя (статическое трение). После прохождения точки, характеризующей критическое значение скольжения, начинается падение значения силы трения и, как следствие, коэффициента трения, который при всех остальных нарастающих значениях λ не изменяется, и его принято обозначать как коэффициент трения скольжения [1].

Процессы, происходящие в контакте колеса и опорной поверхности, носят достаточно сложный характер, который сегодня объясняется современной молекулярно-механической теорией трения, в разработку ее внесли большой вклад российские и зарубежные ученые: Б.В. Дерягин, И.В. Крагельский, Ф. Боуден, Д. Тейбор, Г. Томлинсон и др. [6–8]. Согласно этой теории, трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу и силу трения представляют суммой молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих. Адгезионная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных либо межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами. Деформационная составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому оттеснению выступов контактирующих.

Отличие скорости поступательного движения мобильной платформы от должной ему соответствовать скорости вращения колеса — достаточно известный факт, при этом нужно указать, что в зависимости от режима движения колеса это отличие будет различным [1–5, 8–10].

В условиях движения для ведущих колес и для всех колес в режиме торможения, помимо радиальной деформации, возникает окружная деформация шины [3–5, 13]. Окружная деформация шины возникает под действием крутящего момента на колесе, который отражается в деформации боковин и протектора шины, в результате обод колеса поворачивается на некоторый угол α относительно части протектора, находящегося в контакте с поверхностью качения. Соотношение между крутящим моментом и угловой деформацией называют жесткостью шины в окружном направлении. Так как площадка контакта жестко фиксирует контакт колеса и поверхности, то возникает касательная сила, под действием которой шина деформируется в продольном направлении. Продольную деформацию можно оценить смещением оси колеса относительно геометрического центра пятна контакта. Окружная деформация и продольная связаны друг с другом: чем больше окружная деформация, тем больше значение касательной силы и тем выше значение продольной деформации шины.

При нагружении колеса в плоскости, параллельной поверхности качения колеса, возникает угловая деформация шины. В этом случае шина разворачивается относительно пятна контакта, в пределах упругой деформации, на некоторый угол δ , и средняя линия её протектора принимает форму $abcd$ (рис. 3).

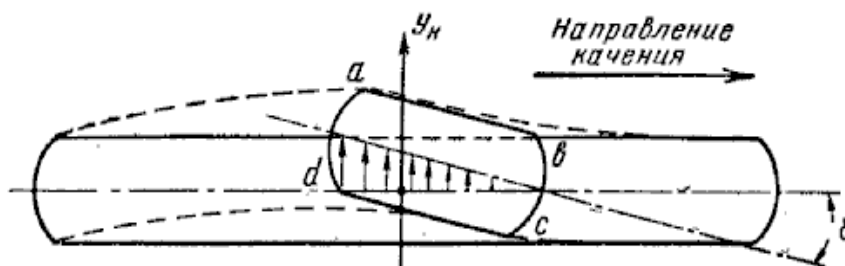


Рис. 3. Угловая деформация шины

Угловая жесткость (податливость) оказывает влияние на показатель управляемости. Вследствие допустимой (умеренной) угловой деформации шины облегчается поворот колеса во время движения и снижается проскальзывание элементов протектора в пятне его контакта с дорогой [4].

С учетом раскрытых ранее деформационных изменений в колесе при движении различают динамический и кинематический радиусы колеса. Под динамическим радиусом (r_d) понимают плечо приложения толкающей силы, в различных режимах движения мобильной платформы будет изменяться жесткость колеса, что приведет к тому, что радиус колеса будет отличаться от статического радиуса [4].

В железнодорожной технике получило широкое распространение понятие крива (касательные силы по площадке контакта, действующие на колесо, имеют проекцию на горизонтальную ось пути, направленную в сторону движения, равнодействующую этих внешних сил называют силой крива (в теории тяги поездов – силой сцепления). Теория крива основана на двух следующих утверждениях:

а) величина крива пропорциональна продольной деформации периферии колеса в окрестности области контакта;

б) сила F_x , с которой опорная плоскость действует на колесо в продольном направлении при псевдоскольжении, пропорциональна продольной деформации колеса.

В связи с вышеописанными особенностями реализация трения качения приводит к возникновению потерь. Разделим движение колеса на два режима, режим ведомого колеса и режим ведущего колеса, но режимов может быть больше [4–5]. Начнем анализ с ведомого колеса, на которое действуют следующие силы (рис. 4) [14].

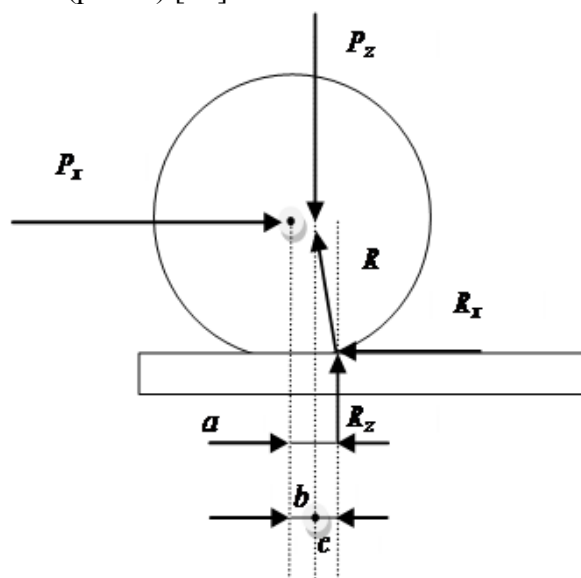


Рис. 4. Возникновение силы трения качения для ведомого колеса

В ведущем режиме на ось колеса в продольном направлении прилагается толкающая сила P_x , которая вызывает смещение оси в этом направлении на величину c [5]. Нормальная реакция смещается от проекции оси на величину $b=a-c$. Сила R , являющаяся равнодействующей сил реакции R_x и R_z и направленная к оси колеса, уравнивает P_x и P_z . Одновременно нормальная реакция R_z опорной поверхности за счет смещения на величину $a=L/2$ создает момент $M_f = \frac{L}{2} R_z$, который направлен в противоположную сторону направлению качения колеса и препятствует этому движению, этот момент принято называть моментом трения качения.

Потери при качении во многом определяются внутренними процессами, проходящими в материале колеса, существуют большие различия между шинами разных типов, потери на трение качения больше обусловлены внутренним гистерезисом в материале шины при формировании площадки контакта и ее восстановлении после этого. Помимо гистерезисных потерь, присутствуют потери, вызванные трением скольжения между шиной и поверхностью дороги, сопротивлением воздуха внутри шины, а также вентиляционный эффект, возникающий вследствие вращения колеса с шиной

Таким образом, проведенный анализ показал, что использование обычных пневматических колес позволяет обеспечивать высокую грузоподъемность мобильной платформы, но создает трудности как с точностью управления движением мобильной платформы, так и с точностью позиционирования мобильной платформы в пространстве. Эти трудности связаны со сложными нелинейными характеристиками взаимодействия пневматического колеса и опорной поверхности, которые были выявлены и описаны ранее. Здесь же приходится учитывать нелинейный характер потерь при движении такого рода транспортного средства. Синтез системы управления движением мобильной платформы на пневматических колесах в результате этого представляет собой сложную задачу учета множества нелинейных, нестационарных возмущающих факторов, влияющих на динамику движения. Если мобильная платформа не имеет задачи транспортировки больших грузов, то современным способом решения указанных проблем является использование в качестве движителя omni-колес. Главной их особенностью являются почти полное отсутствие трения качения и возможность движения мобильной платформы в любом направлении.

Использование omni-колес как способ решения проблем. Роликонесущее колесо (или omni-колесо) — это колесо, позволяющее транспорту двигаться в любом направлении. Такое название дал ему шведский изобретатель Бенгт Илон, разработавший его в 1973 году [11]. С тех пор эти колеса привлекают внимание разработчиков роботов во всем мире. Такой интерес связан, прежде всего, с возможностью построения omni-платформ, т.е. платформ для мобильных роботов, способных перемещаться по плоскости в любых направлениях в любой момент времени без переориентации [11–12].

Существуют два вида роликонесущих колес: роликонесущее колесо с положением роликов под 90° и роликонесущее колесо с положением роликов под 45° , при определенном угле между роликами и осью колеса можно получить дополнительную, по сравнению с традиционным колесом, степень свободы. Общий вид колес представлен на рис. 5.



Рис. 5. Omni-колеса с роликами, установленными под 90°

Как видно на рис.5, основное отличие omni-колеса от обычного — это наличие роликов, позволяющих производить движение в направлении, отличном от направления самого колеса. Ролики могут быть установлены под углом 45° и 90° относительно оси вращения на протяжении всей длины окружности колеса.

Принцип действия данных колес заключается в следующем: путём изменения направления и скорости вращения колес можно заставить платформу, оснащенную данными колесами, двигаться в любом направлении, не только вправо-влево, вперед-назад, но и диагонально, не совершая при этом дополнительных действий для поворота.

Основное достоинство таких колес — их конструкция позволяет вращаться на месте при минимальной силе трения и низком вращательном моменте. Хотя гусеничные платформы и используют подобный способ для вращения, но они могут существенно повредить поверхность, по которой передвигаются. К тому же для преодоления силы трения при вращении на земле требуется наличие двигателя с более высоким крутящим моментом. Также к преимуществам данных колес можно отнести высокую статическую устойчивость и высокую маневренность.

Недостатки данных колес — это сложная система управления и относительно высокая стоимость.

Для оценки замены пневматического колеса была разработана мобильная платформа на основе omni-колес. В качестве кинематической схемы была выбрана трехколесная платформа с omni-колесами, ролики которых расположены под углом 90° к оси вращения. Общий вид платформы показан на рис. 6.

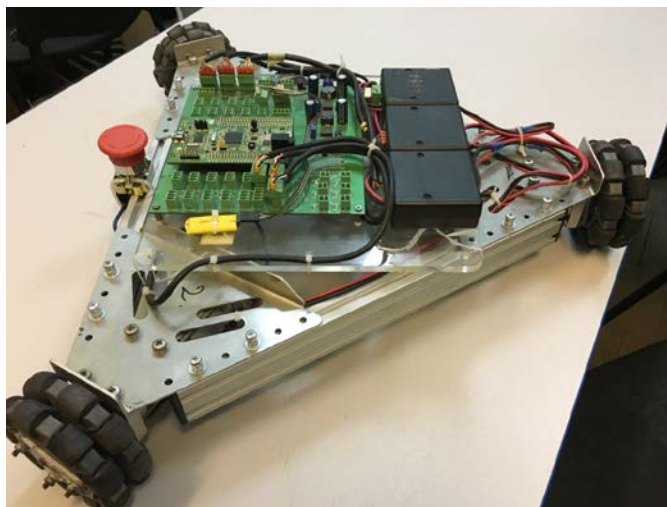


Рис. 6. Общий вид мобильной платформы на omni-колесах

Как видно на рис.6, выбранная схема обеспечивает высокую маневренность, высокую статическую устойчивость. Блок электроники представлен на рис.7.

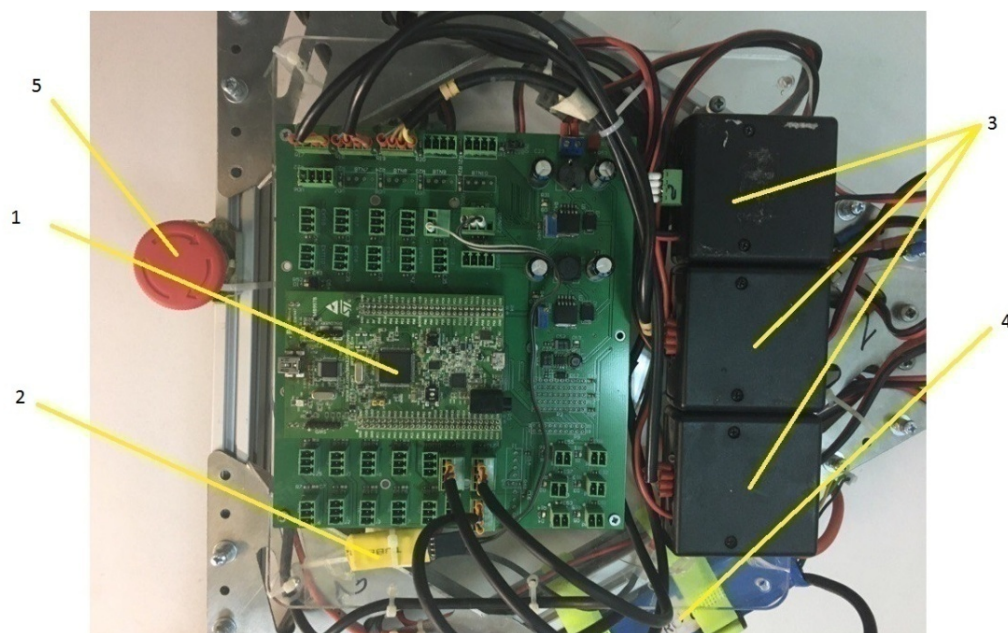


Рис. 7. Блок электроники мобильной платформы

На рис.7 изображены: 1 — микроконтроллер, который используется для сбора и обработки информации с датчиков первичной информации и проведения необходимых вычислений с формированием сигналов управления на исполнительные механизмы, 2 — для осуществления связи с ПК посредством беспроводного интерфейса Bluetooth используется bluetooth модуль, 3 — драйверы двигателей, которые служат для управления двигателем, 4 — в качестве источника энергии используется аккумулятор, 5 — аварийная кнопка для отключения системы в экстремальных условиях.

Общий вид привода с колесом изображен на рис.8.

Разработанная мобильная платформа позволила провести серию натурных экспериментов, которые показали, что проблемы, озвученные в предыдущей части статьи, возможно частично компенсировать за счет использования в мобильной платформе omni-колеса как движителя системы.

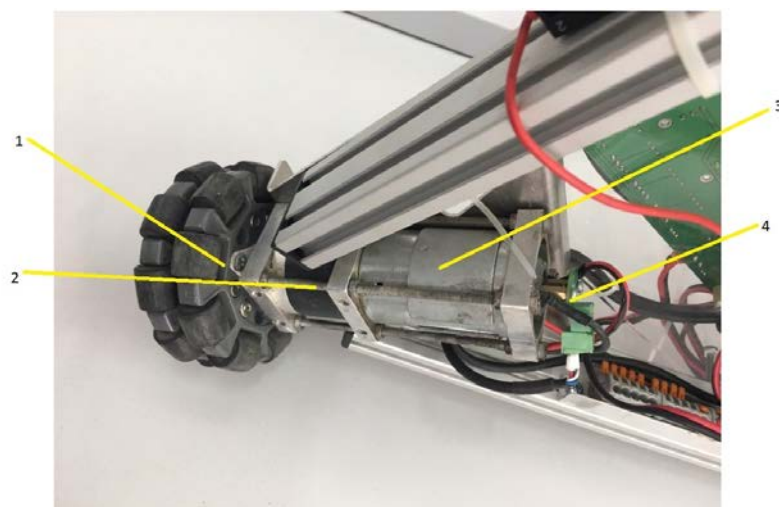


Рис. 8. Привод мобильной платформы: 1 — omni-колесо, 2 — редуктор, 3 — двигатель, 4 — энкодер, который используется для измерения угловых и линейных перемещений

Заключение. Представленный в работе анализ показал, что использование обычных пневматических колес позволяет обеспечивать высокую грузоподъемность мобильной платформы, но создает трудности как с точностью управления движением мобильной платформы, так и с точностью позиционирования мобильной платформы в пространстве. Эти трудности связаны со сложными нелинейными характеристиками взаимодействия пневматического колеса и опорной поверхности, нелинейным характером потерь при движении такого рода транспортного средства.

Авторами предложено выявленные проблемы для случая мобильной робототехнической платформы частично компенсировать за счет использования в мобильной платформе omni-колеса как движителя системы.

Библиографический список

1. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Д. Харрис [и др.]. — Москва : Интекст, 2002. — 408 с.
2. Смирнов, Г. А. Теория движения колесных машин / Г. А. Смирнов. — 2-е изд., доп. и перераб. — Москва : Машиностроение, 1990. — 352 с.
3. Мамаев, А. Н. Определение размеров площадки контакта и прогиба колеса с резиновой шиной при статическом прижатии колеса к жесткому основанию / А. Н. Мамаев, Е. А. Алепин // Сб. научных трудов «Машиноведение». — Челябинск. — 1980. — №. 251. — С. 82–85.
4. Вонг, Дж. Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. — Москва : Машиностроение, 1982. — 284 с.
5. Работа автомобильной шины / В. И. Кнороз [и др.] ; под ред. В. И. Кнороза. — Москва : Транспорт, 1976. — 238 с.
6. Семенов, А. П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах / А. П. Семенов. — Москва : Наука, 1972. — 160 с.
7. Шустер, Л. Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л. Ш. Шустер. — Уфа : Гилема, 1999. — 198 с.
8. Балакина, Е. В. Расчет ϕ -S диаграмм на основе результатов зарубежных экспериментов / Е. В. Балакина // Автомобильная промышленность. — 2014. — №6. — С. 18–19.
9. Лапшин, В. П. Модель связи вертикальных деформаций с возникновением циркуляционных сил в системах «колесо — рельс» / В. П. Лапшин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 8–2. — С. 1424–1431.
10. Лапшин, В. П. Алгоритм диагностирования состояния контакта колеса с дорожным покрытием / В. П. Лапшин, И. А. Туреин // Автомобильная промышленность. — 2015. — №. 5. — С. 16–20.
11. F. G. Pin, S. M. Killough. A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots / IEEE transactions on robotics and automation. — 1994. — Т. 10. — №. 4. — С. 480–489.
12. L. Huang et al. Design and analysis of a four-wheel omnidirectional mobile robot / 2nd International Conference of Autonomous Robots and Agents. — 2004. — С. 425–428.
13. Nosachev S.V. Influence of Deformation Effects on Wheeled Systems Dynamics / S. V. Nosachev, M.V. Chuveyco /, Procedia Engineering, 2017, V206 -P.260–265.
14. Nosachev S.V. Dynamic monitoring of the driving wheels' pre-sliding of the railway transport / S.V. Nosachev, M.V. Chuveyco //, MATEC Web Conf XIII International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", 2017, V132, №02004