

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629873>

Оригинальное исследование



Геометрия, кинематика и динамика Месапум колеса. Неустановившееся движение Месапум транспортёра

А.С. Дьяков, Д.С. Фёдоров

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Месапум колёса обеспечивают транспортному средству возможность движения в любом желаемом направлении и позволяют значительно повысить его манёвренность при движении по плоской опорной поверхности. При проектировании транспортного средства расчётные нагрузки определяют требуемые движущие моменты на колесе, а значит и характеристики всего привода. Таким образом, вычисление нагрузок, действующих на Месапум колёса в установившихся и переходных режимах движения является наиболее актуальной задачей, связанной с Месапум колесом.

Цель — определение тяговых характеристик приводов Месапум колёс, обеспечивающих заданную подвижность транспортного средства.

Методы. Моделирование движения транспортного средства с Месапум колёсами производится в программном комплексе анализа динамики системы тел. Контактное взаимодействие роликов Месапум колеса с опорной поверхностью описано с точки зрения теории качения.

Результаты. Предложен простой начертательный способ построения профиля роликов. Вычислены скорости транспортного средства, колёс и роликов при различных направлениях и режимах движения. Представлены требуемые для движения с этими скоростями движущие моменты.

Заключение. Представленная в данной работе модель Месапум транспортёра позволяет определить кинематические и динамические характеристики движения по плоской опоре в любом режиме движения.

Ключевые слова: Месапум, ОМНИ; колесо Илона; всенаправленное движение; качение; транспортёр; контактное взаимодействие.

Как цитировать:

Дьяков А.С., Фёдоров Д.С. Геометрия, кинематика и динамика Месапум колеса. Неустановившееся движение Месапум транспортёра // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 2. С. 139–148. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629873>

Рукопись получена: 02.04.2024

Рукопись одобрена: 31.05.2024

Опубликована online: 31.05.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629873>

Original Study Article

Geometry, kinematics and dynamics of the Mecanum wheel. Unstable motion of the Mecanum vehicle

Alexey S. Dyakov, Dmitry S. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The Mecanum wheels enable the vehicle to move in any desired direction and increase its mobility when moving along a flat surface. When designing a vehicle, the design loads determine the required driving moments and, as a result, the characteristics of the drivetrain. Thus, determining the loads acting on the Mecanum wheels in stationary and transition events is the most relevant task related to the Mecanum wheel.

AIM: Determination of the traction characteristics of the Mecanum wheel drives, ensuring the given mobility of the vehicle.

METHODS: Simulation of motion of a vehicle with the Mecanum wheels is carried out in the multibody dynamics' software package. The contact interaction of the Mecanum wheel and rollers with the surface is described on the basis of the rolling theory.

RESULTS: A simple descriptive method for building a roller profile is proposed. The velocities of the vehicle, wheels and rollers for various directions and modes of motion, are calculated. The driving torque required for motion at these velocities is presented.

CONCLUSION: The Mecanum vehicle model makes it possible to determine the kinematic and dynamic characteristics of motion along a flat support in any mode of motion.

Keywords: Mecanum; OMNI; Ilon wheel; omnidirectional motion; rolling; vehicle; contact interaction.

To cite this article:

Dyakov AS, Fedorov DS. Geometry, kinematics and dynamics of the Mecanum wheel. Unstable motion of the Mecanum vehicle. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2024;18(2):139–148. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-629873>

Received: 02.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Published online: 31.05.2024

ВВЕДЕНИЕ

Месанум колесо — это роликонесущее колесо с беговой дорожкой (цилиндрическим ободом), образованной совокупностью поверхностей роликов. Оси роликов закреплены на диске колеса равноудаленно от центра колеса и наклонены к оси колеса на угол 45° (рис. 1). Месанум колесо также называется колесом Илона, по фамилии инженера шведской компании Месанум АВ, запатентовавшего такую конструкцию в 1972 году [1]. Независимое вращение роликов добавляет колесу при контакте с опорой дополнительную степень свободы. Таким образом, изменение соотношения скорости вращения колеса и ролика обеспечивает Месанум колесу возможность перемещения по плоскому опорному основанию в любом направлении.

Колёса Месанум нашли применение в технике, выполняющей широкий круг задач. Все мобильные роботы компании КУКА оснащены Месанум колёсами в качестве ходовой системы. Так, мобильные платформы КУКА omniMove на заводе Airbus в Гамбурге в ограниченном пространстве перемещают большегрузные детали весом до 90 тонн и длиной до 15 метров, а мобильные

подъёмные рабочие платформы KUKA Triple Lift используются для обслуживания и ремонта самолётов. Компания OKTA Lift занимается производством вилочных погрузчиков, которые используются для перемещения грузов в крайне стеснённых условиях: на складах, кораблях. Манчестерский университет разработал мобильного робота класса мини с изменяемой геометрией рамы, приспособленного для исследований, связанных с радиоактивным загрязнением, на атомных электростанциях. Производство Месанум колёс освоено зарубежной промышленностью.

Несмотря на доступность транспортных средств с Месанум колёсами, в научном сообществе не опубликована теория движения Месанум колеса, с достаточной точностью описывающая тяговый режим, ускоренное движение, резкую смену направления движения, переходные режимы, в том числе пуск-останов. Большое число работ, исследующих подвижность Месанум платформ, опираются на упрощённые кинематические зависимости, которые не согласуются с экспериментальными данными [2]. Наиболее проработанная динамическая модель платформы с Месанум колёсами разработана Б.И. Адамовым и его соавторами [3–5]. Основным допущением, принятым

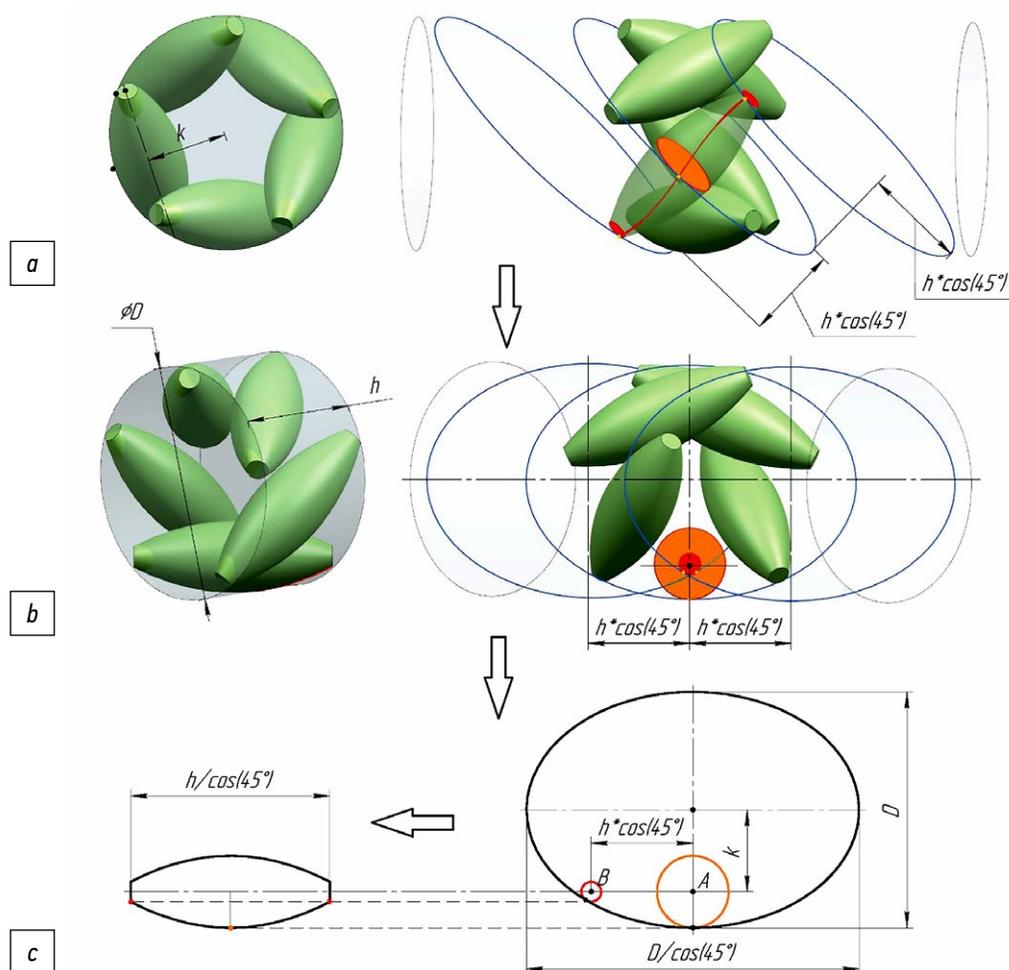


Рис. 1. Месанум колесо: *a, b* — проекции месанум колеса; *c* — схема построения ролика.
Fig. 1. A mecanum wheel: *a, b* — plane projections of the Mecanum wheel; *c* — scheme for building a roller.

в этих работах, является отсутствие проскальзывания между роликами и опорной поверхностью, в том числе и при ускоренном движении платформы — т. е. не учёте неустойчивый характер связи ролика и опорной поверхности. Также в этих работах приняты другие допущения: безынерционные ролики; в контакте с поверхностью всегда только один ролик.

Абсолютное движение Месапум колеса является сочетанием двух движений: переносного вращения всего колеса с роликами как единого целого и относительного вращения роликов. Можно и следует рассматривать движение Месапум колеса с точки зрения теории качения колеса [6], считая ролики катящимися колёсами переменного радиуса с периодически изменяющимся углом развала.

Ключевым параметром, связывающим кинематические и динамические характеристики катящегося колеса, является коэффициент реакции в пятне контакта φ [6] — эмпирическая нелинейная зависимость касательной реакции от скольжения в пятне контакта. Он устанавливает связь движущих моментов на колёсах (через касательные реакции и скольжение) со скоростями движения транспортного средства, скоростями вращения колёс и роликов. Таким образом, без учёта изменения коэффициента φ невозможно установить адекватное соответствие кинематических и динамических характеристик Месапум платформы, т. е. решить прямую и обратную задачи динамики.

Ряд значительных допущений, принятых в существующих моделях Месапум колеса, говорят о существенных трудностях, возникающих при решении уравнений динамики Месапум колеса аналитическими методами. Вследствие этого описываемая в данной работе модель создана с использованием программного комплекса моделирования динамики тел.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСАПУМ КОЛЕСА

Для снижения ударных нагрузок при качении Месапум колеса необходимо, чтобы поверхности роликов с высокой точностью вписывались в цилиндрический обод колеса. Геометрически точный профиль ролика, соответствующий данному требованию, получен А. Фреррером. Образующей такого идеального ролика является плоская кривая восьмого порядка. Фреррер также делает вывод об избыточной точности идеальной образующей для практических задач [7]. Далее описан простой метод аппроксимации профиля ролика на основе точно вычисленных диаметров центрального и торцевого сечений ролика.

Результатом пересечения плоскостей поперечных сечений ролика и цилиндрического обода колеса будут идентичные эллипсы. Если каждое из поперечных сечений ролика будет касательным к эллипсу, который образуется плоскостью этого сечения, то и вся поверхность ролика будет касательной к цилиндрическому ободу колеса. 3D-моделированием выявлено, что достаточно

точную поверхность ролика возможно получить, построив лишь центральное и торцевые сечения роликов. Такое построение возможно выполнить на простой плоской схеме (см. рис. 1, с).

Исходными данными для построения ролика являются ширина колеса h , диаметр обода колеса D и расстояние между осями колеса и ролика k . На рис. 1, b показана проекция колеса, для которой плоскости сечений ролика параллельны плоскости проекции, а ось ролика — перпендикулярна. Сечения ролика на этой проекции концентричны, а эллипсы равны и смещены на равные эксцентриситеты. Возможно перейти к эквивалентной схеме (см. рис. 1, с), на которой, наоборот, центры эллипсов совпадают, а центры сечений ролика смещены на тот же эксцентриситет. Затем необходимо из найденных центров построить окружности, которые касаются эллипса, они и будут искомыми центральным и торцевыми сечениями ролика. Далее следует интерполировать остальные сечения ролика параболой, опираясь на радиусы построенных сечений.

Автоматически построенный средствами 3D-моделирования след пересечения построенной поверхности ролика с цилиндрическим ободом колеса показан на рис. 1, a красными линиями. Узость следа говорит о высокой точности полученной аппроксимации.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТЁРА С МЕСАПУМ КОЛЁСАМИ

Моделирование динамики транспортного средства с Месапум колёсами проводилось в программном комплексе анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» [8]. Средствами программного комплекса создаётся система твёрдых тел, каждое из которых связано посредством шарниров (связей) по меньшей мере с одним другим. Затем к системе прикладываются активные силы. Уравнения движения системы тел автоматизировано синтезируются с использованием формализма Ньютона-Эйлера и имеют вид дифференциально-алгебраических уравнений. Для интегрирования жёстких дифференциальных уравнений (при наличии контактных сил) используется метод Парка с выводом матриц Якоби. Уравнения движения систем тел в общем случае можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q((q, \dot{q}) + GT(q)\lambda \\ g(q) = 0 \end{cases},$$

где q — основные координаты объекта, p — вспомогательные координаты (локальные координаты в разрезанных шарнирах); M — матрица масс, k ; Q — столбцы сил инерции и обобщённых сил соответственно; λ — множители Лагранжа, соответствующие силам реакций в разрезанных шарнирах; второе уравнение системы — алгебраические уравнения связей или условия замыкания

разрезанных шарниров. Матрица G является матрицей Якоби уравнений связей после исключения из них вспомогательных координат [8].

Основные геометрические и инерционные характеристики транспортного средства представлены в табл. 1. Твёрдыми телами в данной модели являются ролики, диски колёс, корпус и опора (рис. 2, *a*). Каждый ролик связан с диском колеса вращательным шарниром с одной степенью свободы. Колёса также связаны с корпусом вращательным шарниром с одной степенью свободы, модель управляется изменением скорости вращения этих шарниров. Корпус связан с опорой шарниром с шестью степенями свободы. Контактное взаимодействие роликов с опорой моделируется силовыми элементами «окружность–плоскость», предназначенными для описания качения. С каждым роликом связаны семь таких окружностей (показаны красным на рис. 2, *b*).

Таблица 1. Основные параметры модели транспортёра

Table 1. Main properties of the vehicle model

Параметр	Значение
Полная масса корпуса, кг	400
Масса диска, кг	1,9
Масса ролика, кг	0,5
Число роликов на колесе, шт	5
Диаметр обода колеса D , мм	250
Ширина колеса h , мм	150
Радиус центра ролика, мм	40,00
Радиус торца ролика, мм	13,16

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РОЛИКОВ С ОПОРОЙ

Контактное взаимодействие в программном комплексе «Универсальный механизм» реализуется в виде модели податливого контакта, при котором допускается внедрение контактирующих элементов тела в опорную поверхность. При наличии контакта рассчитываются две силы: нормальная реакция N — упруго-диссипативно зависящая от глубины и скорости внедрения, и касательная реакция [8].

Негладкая модель ролика (в виде дискретных окружностей) вызывает осцилляции нормальных реакций, которые не будут возникать на практике. Итерационно были выбраны коэффициенты жёсткости $c=3 \times 10^4$ Н/м и диссипации $\mu=200$ Н*с/м в контакте, обеспечивающие колебания нормальных реакций с наименьшей постоянной амплитудой.

Касательная реакция зависит от нормальной реакции и коэффициента реакции в пятне контакта ϕ . В программном комплексе «Универсальный механизм» коэффициент реакции в пятне контакта задаётся кусочно-линейной

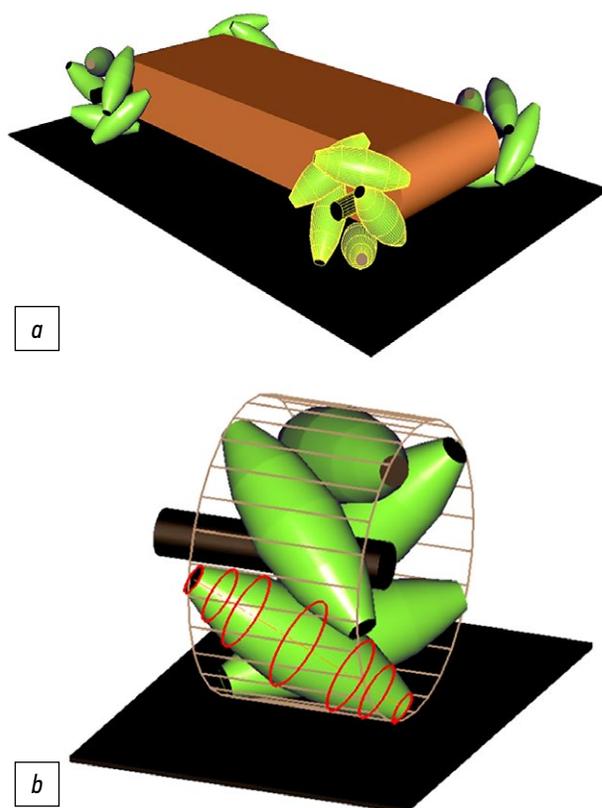


Рис. 2. Динамическая модель транспортёра с Mecanum колёсами: *a* — общий вид транспортёра; *b* — Mecanum колесо и окружности, моделирующие качения ролика.

Fig. 2. The multibody dynamics model of the Mecanum-wheeled vehicle: *a* — the main view of the vehicle; *b* — the Mecanum wheel and the circumferences simulating the roller's motion.

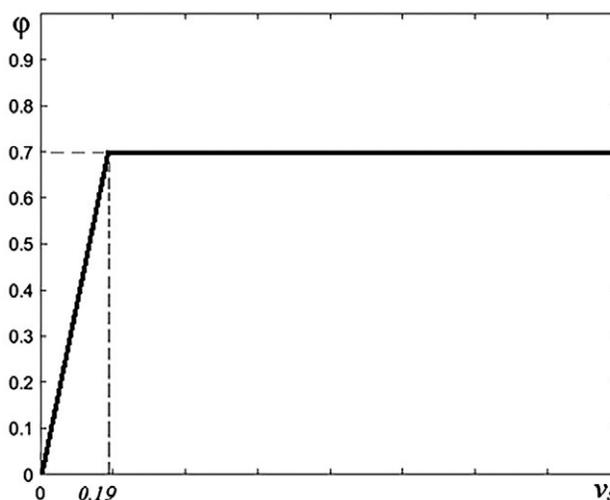


Рис. 3. Зависимость коэффициента ϕ от скорости скольжения в контакте.

Fig. 3. Dependence of the coefficient ϕ on slipping velocity in the contact.

функцией в координатах $\varphi(v_s)$ (рис. 3), где v_s — скорость скольжения, которая определяется автоматизированно.

Подводимый от двигателя к колесу момент расходуется на преодоление сопротивления качению, раскрутку колеса и создание тяги, равной или превышающей касательную реакцию. Сопротивление качению роликов вызвано трением в подшипниках скольжения. Для Mecaput колеса наиболее значительной и наиболее изменяющейся составляющей, на которую расходуется движущий момент, является преодоление касательной реакции. Она может изменяться в пределах от $0 \cdot N$ до $0,7 \cdot N$ только за счёт изменения φ . Таким образом, φ в не меньшей степени, чем уравнения динамики, определяет нужный момент для движения с заданной скоростью и ускорением.

УПРАВЛЕНИЕ ВСЕНАПРАВЛЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Наибольшая достижимая скорость движения транспортёра определяется характеристиками приводов колеса, поэтому в рассматриваемой модели скорости вращения всех колёс ограничены величиной ω_{\max} . Для прямолинейного движения необходимо, чтобы скорости вращения колёс, расположенных по диагонали транспортёра, были равны. Для движения в выбранном направлении с наибольшей достижимой скоростью скорости вращения колёс должны соответствовать зависимостям на рис. 4.

Опорную плоскость можно разделить относительно транспортного средства на 4 сектора: вправо-вперёд, влево-вперёд, влево-назад, вправо-назад. Для выбора направления движения в пределах сектора одна из пар скоростей $\omega_{1,3}$ и $\omega_{2,4}$ должна изменяться в пределах $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, скорости другой пары при этом не изменяются (см. рис. 4).

Для поворота транспортёра вокруг его геометрического центра необходимо выполнение равенства:

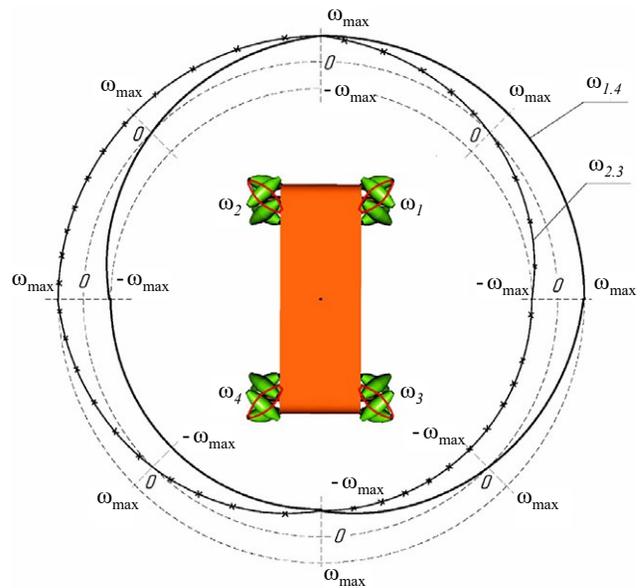


Рис. 4. Скорости вращения колёс, необходимые для всенаправленного движения с максимальной скоростью.

Fig. 4. Wheel speeds required for the omnidirectional motion at maximal velocity.

$$\omega_1 = \omega_3 = -\omega_2 = -\omega_4.$$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 показаны результаты вычисления действующих в процессе движения нормальных реакций: N_p — действующих на ролик колеса; $N_{к_факт}$ — на всё колесо; $N_{факт}$ — на весь транспортёр. Моделирование поверхности ролика дискретными окружностями приводит к колебаниям нормальных реакций, эти колебания по своей

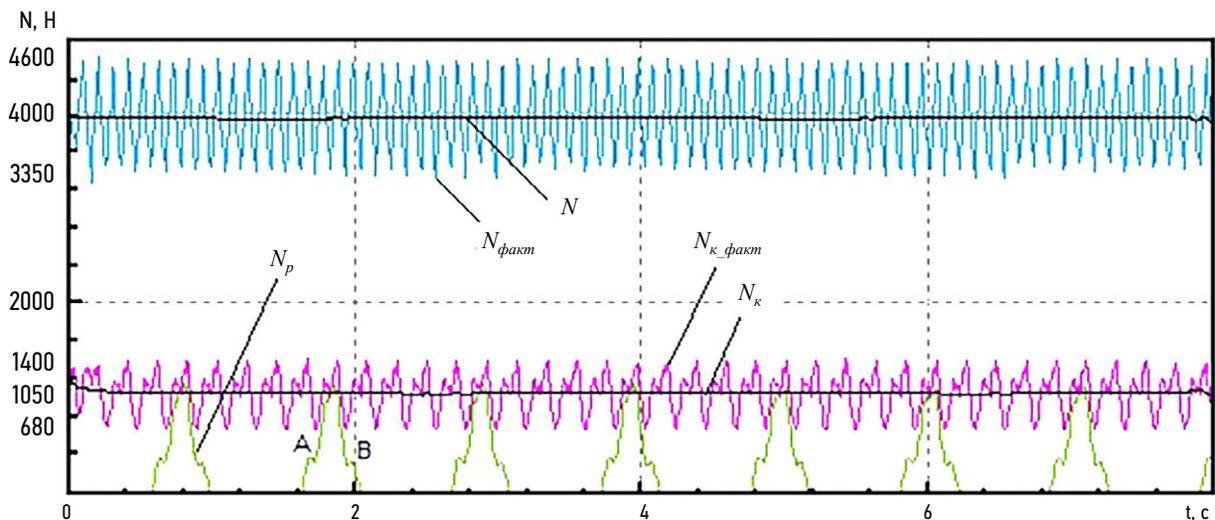


Рис. 5. Фактические и средние нормальные реакции, действующие на отдельный ролик, колесо и весь транспортёр.

Fig. 5. Actual and average normal forces acting at the individual roller, the wheel and the vehicle.

сути являются результатом дискретизации модели ролика. Среднее значение нормальных реакций вычисляется фильтром скользящего среднего с шириной окна 0,4 секунды. На рис. 5 N_k — среднее значение нормальных реакций, действующих на колесо, N — среднее значение суммы нормальных реакций, действующих на весь транспортёр.

Отклонение амплитудного значения $N_{к\text{ факт}}$ от вычисленного среднего N_k составляет 35%. Амплитудные значения реакций следует трактовать как возможные предельные перегрузки. Ожидаемые перегрузки при движении гладких роликов по неидеально ровной поверхности стоит в первом приближении принять равными 35%.

Горизонтальные участки А и В на графике нормальной реакции отдельного ролика (см. рис. 5) показывают промежутки времени, в которые сразу 2 ролика контактируют с опорой. Также необходимо отметить, что в данной модели каждый ролик контактирует с поверхностью дольше, чем должен, из-за сниженной жёсткости контакта с и завышенного внедрения в опору.

Представленные далее значения движущих моментов (рис. 9) получены аналогичной обработкой. Графики скоростей (рис. 8) никакой статистической обработке не подвергались.

Из-за применения фильтра скользящего среднего на участках движения с режимом пуск-стоп средние движущие моменты незначительно опережают подаваемые команды управления (рис. 8, 9).

УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ

Скорости вращения всех колёс ограничены величиной $\omega_{\text{max}} = 6$ рад/с. Для такого ограничения получены значения достижимой линейной скорости робота v и требуемого момента M на колёсах робота при различных

направлениях движения. Зависимость модуля вычисленной скорости от направления представлена на рис. 6, а, зависимость модуля требуемого момента для движения в заданном направлении со скоростью v представлена на рис. 6, б. Результаты виртуального моделирования отмечены на рис. 6 точками.

Исследован поворот транспортёра при ограничении скорости вращения всех колёс величиной $\omega_{\text{max}} = 6$ рад/с. Размеры колёсной базы оказывают влияние на поворачиваемость. При длине колёсной базы 1 м и ширине 0,56 м Mecanum транспортёр способен поворачивать с угловой скоростью 1,2 рад/с. Для поворота требуется подвести к каждому колесу момент $M=51.5$ Н.

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ

Скорости вращения всех колёс ограничены величиной $\omega_{\text{max}} = 6$ рад/с. Управление движением производилось в ручном режиме при помощи виртуального джойстика, принцип управления всенаправленным движением соответствует рис. 4. Траектория центра заднего левого Mecanum колеса показана красной линией на рис. 7.

Движение транспортёра можно разделить на 4 участка (рис. 7, 8, 9):

- 1 — разгон, движение вперёд, торможение;
- 2 — начало поворота, поворот на месте на 110° вправо, торможение;
- 3 — разгон, боковое движение влево, торможение;
- 4 — разгон, боковое движение влево, плавное изменение направления движения влево-назад-вправо, боковое движение вправо (без поворота транспортёра).

На рис. 8 представлены кинематические характеристики транспортёра: модуль линейной скорости $|v|$ транспортёра, модуль переносной скорости точек беговой дорожки

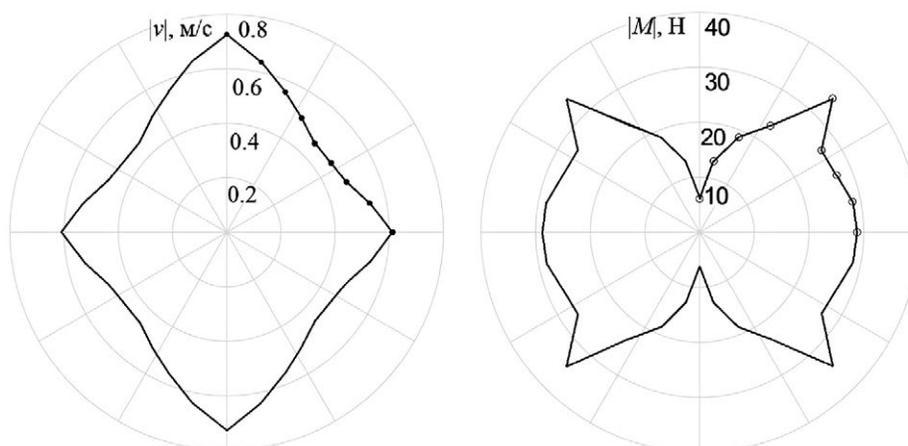


Рис. 6. Тяговая характеристика Mecanum транспортёра при ограничении максимальной скорости вращения колёс 6 рад/с: а — достижимая скорость транспортёра при разнонаправленном движении; б — требуемый для реализации достижимой скорости момент.
Fig. 6. Traction characteristics of the Mecanum vehicle with a maximal rotation velocity limited to 6 rad/s: a — the achievable velocity at the multidirectional motion; b — the torque required to achieve this velocity.

заднего левого колеса $|v_{к4}|$, модуль относительной средней скорости точек поверхностей роликов заднего левого колеса $|v_{р4}|$. Следует отметить, что модуль средней скорости точек поверхности ролика заднего левого колеса $|v_{р4}|$ (рис. 8) не обращается в ноль при остановке колеса

($|v_{к4}| = 0$) из-за того, что данный ролик в момент остановки колеса не находится в контакте с опорной поверхностью и продолжает вращение по инерции.

На рис. 9 представлены динамические характеристики транспортера.

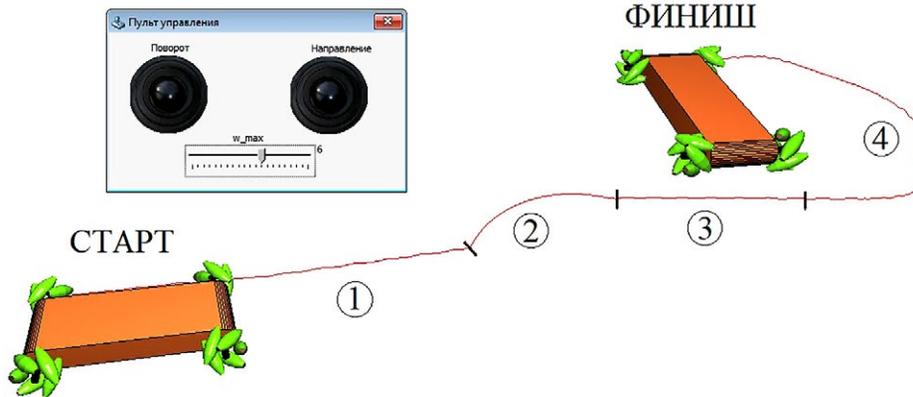


Рис. 7. Движение транспортера под управлением джойстиком, траектория заднего левого колеса.

Fig. 7. The vehicle motion controlled with a virtual joystick, rear left wheel trajectory.

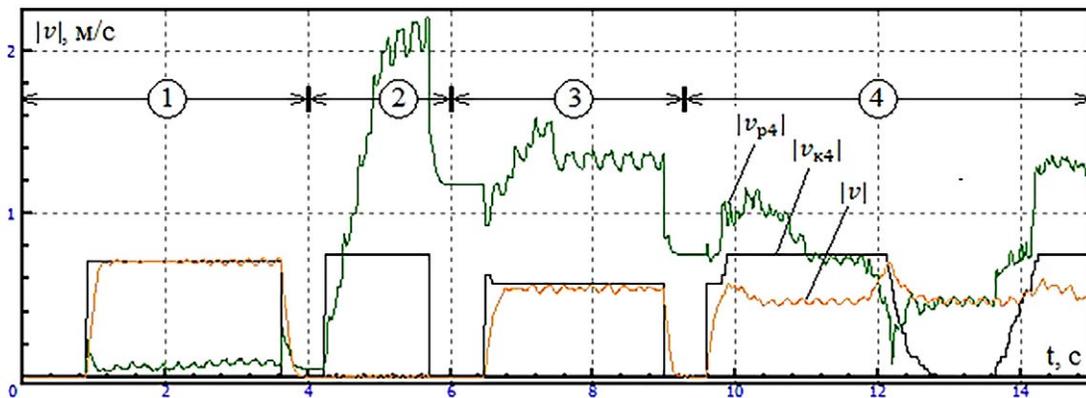


Рис. 8. Кинематические характеристики неустановившегося движения.

Fig. 8. Kinematic characteristics of the unstable motion.

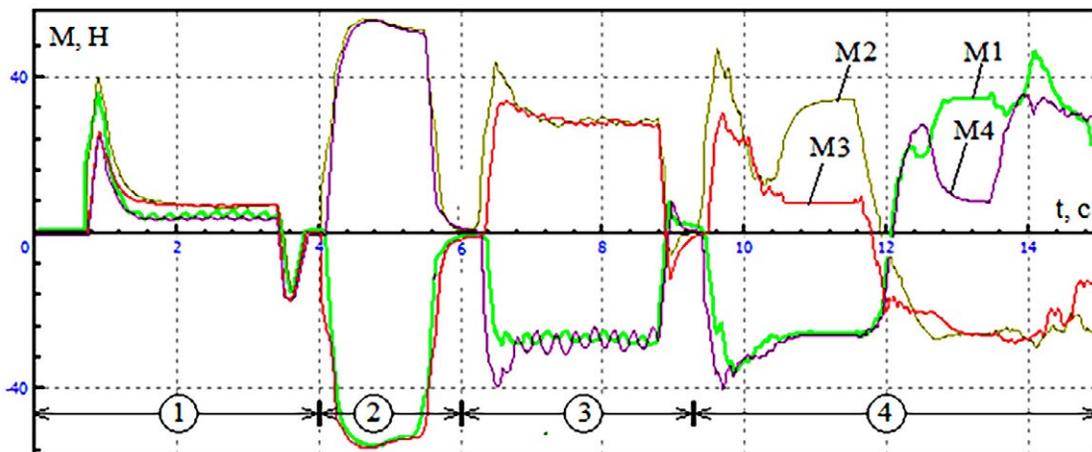


Рис. 9. Движущие моменты, необходимые для неустановившегося движения.

Fig. 9. Driving torques required for the unstable motion.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана динамическая модель Mecanum колеса и Mecanum транспортёра, учитывающая неголономный и неустойчивый характер связи роликов с опорой, характерный для катящихся тел. Предложен простой начертательный способ построения профиля роликов. Описан алгоритм обработки результатов динамического моделирования, позволяющий снизить влияние дискретизации модели и получить адекватные значения динамических характеристик.

Проведено сравнение скоростей и потребных движущих моментов для установившегося движения в различных направлениях и в повороте, при условии ограничения максимальной скорости вращения колёс 6 рад/с . Наибольшая возможная при заданных ограничениях линейная скорость достигается при движении вперёд и равна $0,73 \text{ м/с}$, потребный момент равен $6,1 \text{ Н}$, наименьшая — достигается при движении по диагонали и равна $0,46 \text{ м/с}$, потребный момент равен $34,4 \text{ Н}$. Наибольший момент требуется для поворота транспортёра, он равен $51,5 \text{ Н}$, для снижения этого момента стоит уменьшить отношение длины колёсной базы к ширине.

Представлены результаты моделирования переходных режимов движения. Наибольший потребный для неустановившегося движения момент (без учёта потребного для поворота момента) равен $48,2 \text{ Н}$, он достигается при разгоне в боковом направлении.

Определяющими режимами для расчёта привода Mecanum транспортёра являются поворот и разгон в боковом направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patent Sweden B60B 19/12 (20060101); B60b019/00, REF/3876255. Ilon B.E. Wheels for a Course Stable Selfpropelling Vehicle Movable in Any Desired Direction on the Ground or Some Other Base.
2. Hendzel Z., Rykała Ł. Description of Kinematics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels // Modelowanie Inżynierskie. 2015. № 26(57). P. 5–12.
3. Адамов Б.И., Кобрин А.И. Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения KUKA youBot // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 4. С. 251–258. EDN: YUWBPM
4. Adamov B.I. Influence of Mecanum Wheels Construction on Accuracy of the Omnidirectional Platform Navigation (on Example of KUKA youBot Robot). In.: Proc. of the 25th Ann. Saint

REFERENCES

1. Patent Sweden B60B 19/12 (20060101); B60b 019/00, REF/3876255 (Nov 13, 1972). Ilon B.E. Wheels for a Course Stable

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Д.С. Фёдоров — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, создание изображений; А.С. Дьяков — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D.S. Fedorov — search for publications, writing the text of the manuscript, creating images; A.S. Dyakov — editing the text of the manuscript, expert opinion, approval of the final version. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Petersburg Internat. Conf. on Integrated Navigation Systems. 2018. P. 251–254. doi: 10.23919/ICINS.2018.8405889

5. Adamov B.I., Saypulaev G.R. Research on the Dynamics of an Omnidirectional Platform Taking into Account Real Design of Mecanum Wheels (as Exemplified by KUKA youBot) // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2020. Vol. 16, № 2. P. 291–307. EDN: SJBQO

6. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колёсных машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. EDN: QNWYGX

7. Gferrer A. Geometry and Kinematics of the Mecanum Wheel // Comput. Aided Geom. Des. 2008. Vol. 25, N. 9. P. 784–791. doi: 10.1016/j.cagd.2008.07.008

8. Универсальный механизм 9. Руководство пользователя [internet] [дата обращения: 25.02.2024] Режим доступа: <https://www.umlab.ru>.

Selfpropelling Vehicle Movable in Any Desired Direction on the Ground or Some Other Base.

2. Hendzel Z., Rykała Ł. Description of Kinematics of a Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels. *Modelowanie Inzynierskie*. 2015;26(57):5–12.
3. Adamov B.I., Kobrin A.I. Parametric Identification of the Mathematical Model of the Omnidirectional Mobile Robot KUKA youBot. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2018;19(4):251–258 (In Russ).
4. Adamov B.I. Influence of Mecanum Wheels Construction on Accuracy of the Omnidirectional Platform Navigation (on Example of KUKA youBot Robot). In: *Proc. of the 25th Ann. Saint Petersburg Internat. Conf. on Integrated Navigation Systems*. 2018:251–254. doi: 10.23919/ICINS.2018.8405889
5. Adamov B.I., Saipulaev G.R. Research on the Dynamics of an Omnidirectional Platform Taking into Account Real Design of Mecanum Wheels (As Exemplified by KUKA youBot). *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2020;16(2):291–307. EDN: SBJJQO
6. Larin V.V. *Teoriya dvizheniya polnoprivodnykh kolesnykh mashin*. Moscow: MGTU im NE Baumana; 2010. EDN: QNWTGX
7. Gfrerrer A. Geometry and Kinematics of the Mecanum Wheel. *Comput. Aided Geom. Des.* 2008;25(9):784–791. doi: 10.1016/j.cagd.2008.07.008
8. Universal mechanism 9. User manual [internet] cited: 25.02.2024. Available from: <https://www.umlab.ru>.

ОБ АВТОРАХ

* Фёдоров Дмитрий Сергеевич,

студент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;

ORCID: 0009-0006-6141-7864;

eLibrary SPIN: 9122-5314;

e-mail: fds16m576@student.bmstu.ru

Дьяков Алексей Сергеевич,

д-р техн. наук,

профессор кафедры «Колёсные машины»;

ORCID: 0009-0005-7787-2354;

eLibrary SPIN: 9437-8400;

e-mail: Diakov_as@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

* Dmitry S. Fedorov,

Student of the Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots Department;

address: 5 bldg 1 2nd Baumanskaya street, 105005 Moscow,
Russian Federation;

ORCID: 0009-0006-6141-7864

eLibrary SPIN: 9122-5314;

e-mail: fds16m576@student.bmstu.ru

Alexey S. Dyakov,

Dr. Sci. (Engineering),

Professor of the Wheeled Vehicles Department;

ORCID: 0009-0005-7787-2354;

eLibrary SPIN: 9437-8400;

e-mail: Diakov_as@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author