

УДК: 62-254.3

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОЛИКОНЕСУЩЕГО КОЛЕСА  
ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
НЕЛЕТАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ**

**DESIGN FEATURES OF THE MECANUM WHEEL FOR THE MOBILE PLATFORM  
OF THE MOBILE COMPLEX OF NON-LETHAL DESTRUCTION**

*Д.Н. Захаров, М.Н. Челушкин, канд. техн. наук К.С. Кулаков, К.Ю. Бодров*

*D.N. Zakharov, M.N. Chelushkin, Ph.D. K.S. Kulakov, K.U. Bodrov*

*АО «НПО Спецматериалов»*

В данной статье рассмотрены особенности проектирования движителя всенаправленных платформ. Проанализировано состояние современных методов и способов производства роликонесущих колес, а также предложен новый способ создания таких колес. В работе подробно изложена конструкция предлагаемого решения, и описан метод производства составных частей изделия. Кроме того, был выполнен статический расчет на прочность спроектированных узлов конструкции колеса. Также в работе представлены результаты прототипирования данного колеса с помощью аддитивных технологий, и продемонстрирован макет платформы, на которой установлены колеса, разработанной конфигурации.

**Ключевые слова:** роликонесущее колесо, механум платформа, числовое программное управление.

This article discusses the design features of the omni-directional platform propulsion system. The state of modern methods and methods of production of mecanum wheels is analyzed, and a new method of creating such wheels is proposed. The paper describes in detail the design of the proposed solution, and describes the method of production of the components of the product. In addition, a static calculation was performed on the strength of the designed components of the wheel structure. The paper also presents the results of prototyping this wheel using additive technologies, and demonstrates the layout of the platform on which the wheels are installed, the developed configuration.

**Keywords:** roller bearing wheel, mecanum platform, numerical software control.

### **Вводная часть**

Первое роликонесущее колесо было запатентовано более века назад [1]. Под роликонесущим колесом понимается конструкция, позволяющая за счет встроенных в нее под определенным углом, относительно оси своего вращения, роликов иметь возможность совершать движения в нескольких направлениях. Прямое и об-

ратное за счет формы колеса и движение под углом за счет роликов. С момента создания первых подобных колес появились различные разновидности этих всенаправленных колес, такие как: омниколесо, механум-колесо, колесо Лиддиарда и прочие. Интерес ко всем этим видам колес обусловлен эффективностью реализации движения в стесненных условиях с их помощью [1]. В настоящее время роликонесущие колеса

чаще всего находят применение в качестве движителя мобильных платформ различных типов и размеров.

Выполним анализ особенностей проектирования конкретного вида роликонесущих колес — колес-меканум типа. Конструкция такого колеса, при подаче крутящего момента позволяет создавать вектор тяги, направленный под углом в 45 градусов (как правило) к плоскости колеса и оси. Это характерная особенность обусловленная тем, что по периметру обода колеса находятся специальные ролики, располагающиеся под углом в 45 градусов к оси вращения колеса. Ролики равномерно распределены по ободу. Данное конструкторское решение позволяет обеспечивать суммарный вектор тяги, направленный в любую точку плоскости с помощью комбинирования нескольких колес такого типа и независимого управления ими. Количество и расположение колес на платформе зависят от поставленной цели. Основным недостатком такого колеса является сложность проектирования, так как необходимо получить окружность в профиле колеса в крайних точках ролика, иначе при движении будут происходить биения колеса, которые вызывают вибрации на корпусе [2].

Современное развитие систем управления мехатронных систем способствует появлению разработок различной направленности так или иначе связанных с всенаправленными колесами. В настоящее время представлено большое количество публикаций, описывающих кинематику и динамику роликонесущих колес, а также платформ на их основе на плоскости и сфере [2–5]. Достаточно сложно систематизировать

подходы проектирования и способы изготовления таких колес.

### Современное состояние методов производства меканум-колес

Анализ современных технических решений позволил выделить три вида колес меканум типа, представленные на рис. 1 [6]. Основываясь на таком делении условно можно выделить несколько способов производства таких колес предполагая, что при изготовлении основным критерием служит технологичность производства. Исходя из сказанного можно выделить такие методы, как штамповка и гибка листового металла, фрезеровка и литье. В таком случае, отдельно от всех возможных способов получения меканум колес располагаются аддитивные технологии, т.к. данным методом можно получить любое из выделенных ранее типов колес. Способ производства выбирается согласно требованиям, предъявляемым к колесу, размерам партии и прочих условий. Рассмотрим каждый из этих способов и выделим их достоинства и недостатки.

Гибка листового металла позволяет эффективно создавать колеса одного типа (рис. 1, б). Этот способ отличается высокой скоростью производства. Тем не менее, такой метод требует специализированного оборудования. Гибкой производят «лепестки», которые необходимо загнуть на 45 градусов (рис. 1, б). Это место является самой нагруженной частью колеса. В совокупности с высокими требованиями к точности гибки это может негативно сказаться на изделии: колесо может иметь низкую эффективность, выражен-

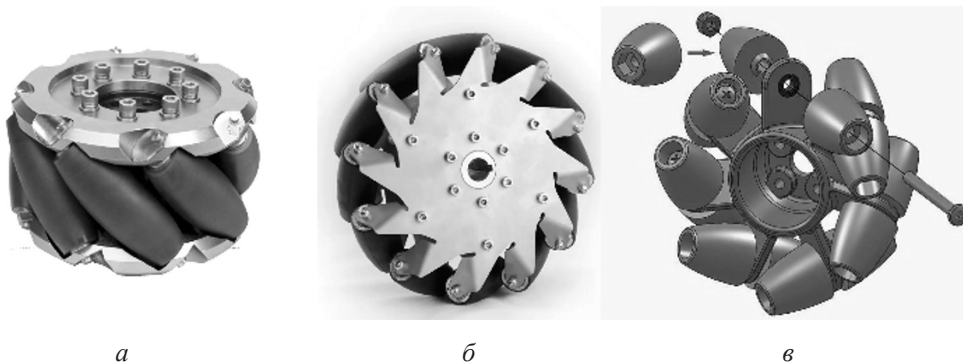


Рис. 1. Виды роликонесущих колес: а — колесо, которое можно получить методом фрезеровки пяти-осевым фрезером / литья / с применением аддитивных технологий; б — колесо, которое можно получить методом гибки / штамповки / применением аддитивных технологий; в — колесо, которое можно получить методом литья / применением аддитивных технологий

ную биениями или вибрацией, либо разрушиться под нагрузкой.

Применение пяти-осевого фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ) для изготовления роликонесущих колёс является затратным по времени и материалам. Кроме того, пяти-осевые фрезерные станки мало распространены в связи со своей высокой стоимостью и специфичностью. Данный метод становится экономически эффективным при больших партиях изделий на автоматизированных предприятиях. Примером колес, изготовленных этим методом является изделие представленное на рис. 1, а.

Самым эффективным методом производства по прочностным характеристикам колес является литье. Данный метод позволяет получить любой из типов колес. При всех преимуществах литья, данный метод отличается огромной ресурсоемкостью, таким образом описываемый метод наиболее эффективен при крупносерийном производстве сверхгабаритных колес.

Самым доступным способом производства является использование аддитивных технологий. Это связано с широким распространением 3D-принтеров. В рамках текущей работы рассмотрим самый распространенный и доступный способ производства аддитивными технологиями — печать полимерными материалами. Этот метод позволяет с наименьшей трудоемкостью (при наличии твердотельной модели в цифровом виде) получить натурную модель изделия. При этом такой метод дает низкую прочностную надежность (по сравнению с любым вышеназванным способом) и длительные сроки производства. Кроме того, при необходимости создания крупногабаритного варианта изделия будет необходимо использовать соответствующие по размерам принтеры. Данный метод рационально использовать при производстве роликонесущих колес для платформ, используемых при прототипировании, или в учебных целях, соревновательной робототехнике и в других задачах не связанных с транспортировкой габаритных грузов.

Существующие методы производства не лучшим образом подходят для создания средне-габаритных колес. В одном случае они не обеспечивают достаточную прочность финального изделия, либо сильно ограничивают возможную грузоподъемность в связи с тем, что

исполнительные двигатели, подбираемые для таких колес, способны обеспечивать работоспособность при большей нагрузке, а сами колеса уже не справляются. В другом случае изготовление таких колес экономически не выгодно, в результате стоимость изделия будет неоправданно завышена.

Тем не менее, в наши дни механум-платформы средней грузоподъемности широко востребованы, поэтому создание нового более эффективного метода производства является актуальной задачей. Под платформами среднего размера подразумевается устройства, способные транспортировать груз массой до 200 кг. Используя новые методы твердотельного проектирования можно повысить эффективность среднегабаритных платформ и упростить внедрение таких платформ в автоматизированные системы хранения и транспортировки, мобильные комплексы нелетального воздействия, работающие внутри помещений или более экзотичные области применения.

В связи с изложенным существует реальная необходимость в создании колес нового типа, производить которые можно используя распространенный трех-осевой фрезерный ЧПУ станок.

#### **Метод проектирования механум-колеса с возможностью изготовления его трех-осевым фрезерным станком**

Обработка на трёх-осевом фрезерном станке накладывает ограничения на форму изготавливаемых деталей и перемещения рабочего инструмента в трех осях. Таким образом, при проектировании колеса необходимо помимо прочностных задач решать и задачи, связанные с ограничениями на изготовление. Исходя из поставленных задач и выявленных ограничений, с помощью прикладной программы КОМПАС-3D была разработана конструкция колеса, представленная на рис. 2. Одной из особенностей данной модели является ее параметризация. Среди переменных, которыми можно управлять для автоматического перестроения модели важно отметить: диаметр колеса, количество роликов, размеры отверстий под крепеж, толщина материала заготовки.

Опишем операции производимые надо заготовками для получения модели разработанной

конструкции: листовой металл требуемой толщины обрабатывается на трех-осевом фрезерном ЧПУ (опционально) станке, вырезаются круглые болванки с заданным диаметром, далее конической фрезой фрезеруются пазы под опоры для роликов (1), конструктивно предусмотрены пазы для выхода инструмента (2). Далее сверлятся отверстия под втулку (3), под крепеж для втулки (4) и под крепеж для соединения между собой половин диска (5). 3D модель половины диска представлена на рис. 2.

3D модель опоры для ролика представлена на рис. 3. Опора для ролика (1) представляет собой деталь имеющую отверстие (2) для крепления осей. Закругление (3) необходимо для уменьшения нагрузки на наиболее уязвимую часть. Опору для ролика возможно изготовить на трех-осевом ЧПУ станке или вырезать, используя лазерную резку. Второй вариант обеспечит высокую скорость и точность производства.

На рис. 4 представлена собранная модель двух половин диска с креплением для роликов. В диск (2) вставляются крепления для роликов (1) далее эту конструкцию соединяют со вторым диском (2) и стягиваются крепежом, проходящим в отверстие (3).

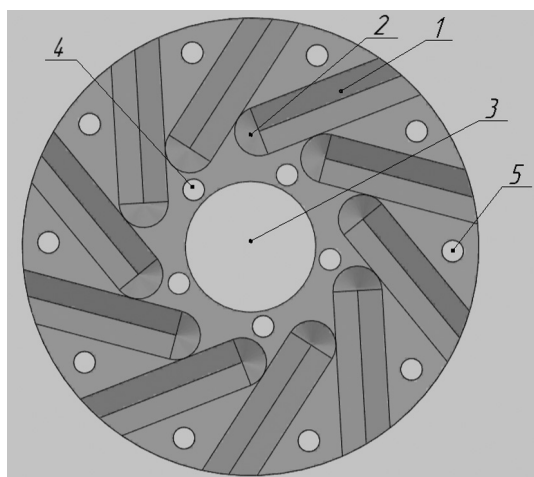


Рис. 2. 3D модель половины диска роликонесущего колеса

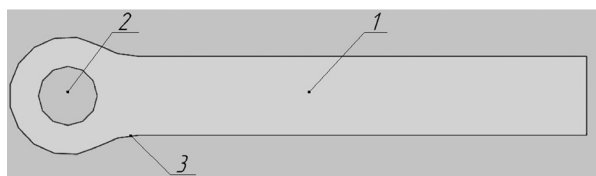


Рис. 3. 3D модель опоры для ролика

Для соединения двух половин дисков на одном валу конструктивно предусмотрена втулка, 3D модель которой в разрезе представлена на рис. 5. Узкая часть втулки (1) входит в отверстия дисков с натягом. Во втулке предусмотрены отверстия (2) для крепления втулки к дискам. Выходной вал исполнительного двигателя (или редуктора) заходит в отверстие (3) и фиксируется с помощью шпонки, заходящей в шпоночный паз (4).

На рис. 6 представлена сборка двух дисков (левостороннего (1) и правостороннего (2)) и втулка (3), соединяющая их. В ходе проектирования не удалось достичь максимальной унификации из-за конструктивных особенностей изделия. Левосторонний и правосторонний диск отличаются друг от друга расположением отверстий под крепеж втулки.

Форма ролика была получена, опираясь на работы [7, 8]. Ролик является сборочной единицей, он представлен на рис. 7.

В состав ролика входят:

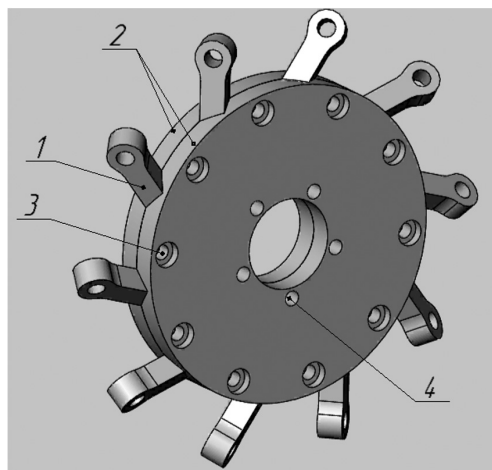


Рис. 4. Сборка диска роликонесущего колеса

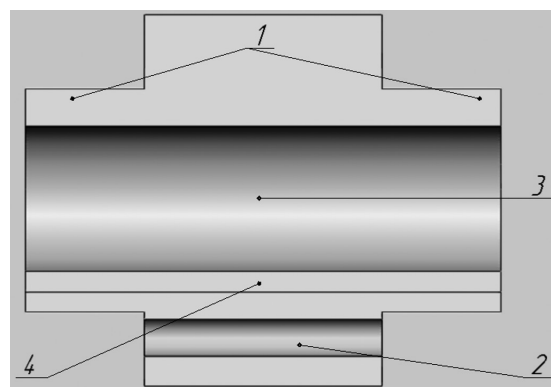


Рис. 5. 3D модель втулки

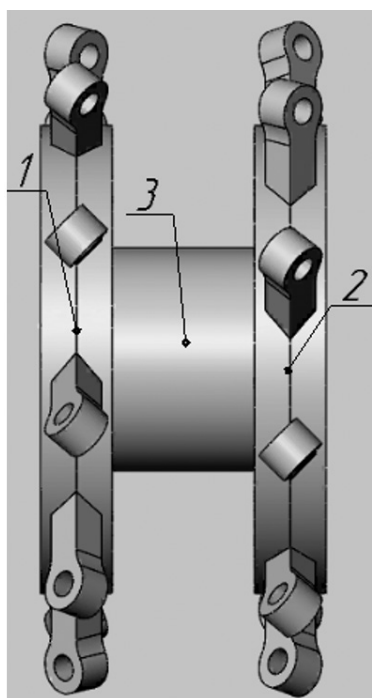


Рис. 6. Сборка дисков и втулки

1) контактная поверхность, изготовленная из полимерных материалов. Лучше всего для этой задачи подходит полиуретан, так как он имеет низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. В ходе работ по созданию необходимой поверхности и опираясь на работу [9] было принято решение изготавливать контактную поверхность ролика из литьевого полиуретана твердостью по Шору 85А.

2) подшипник, позволяющий ролику вращаться вокруг оси, на которую устанавливается

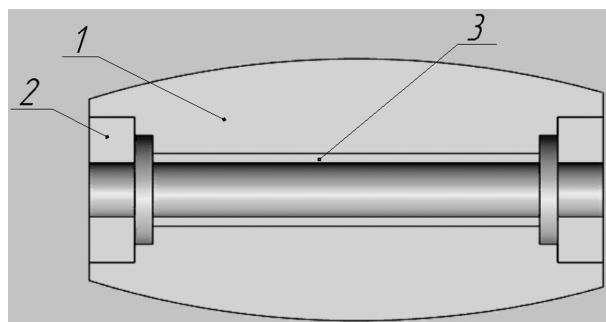


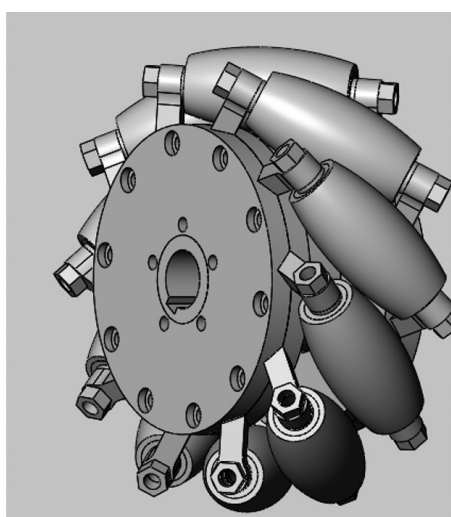
Рис. 7. Сборка ролика

роликом, для возможности вращения подшипника в конструкции предусмотрена полость. Подшипник прижимается к ролику через шайбу зажимом крепления роликов гайками с двух сторон. Важным моментом при производстве поверхности ролика является сплошность материала. Поэтому при использовании литьевого полиуретана необходимо проводить дегазацию.

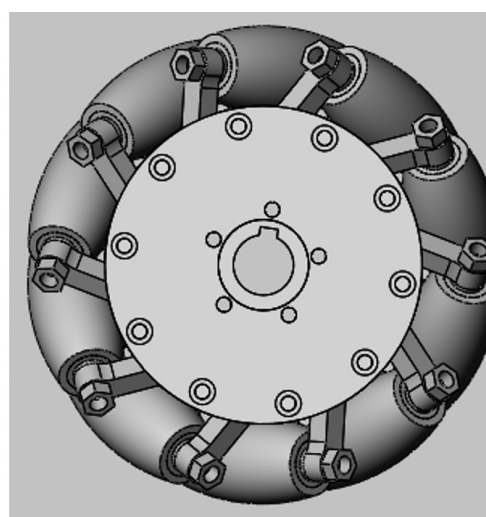
3) стержень, увеличивающий жесткость конструкции.

Как было сказано ранее, профиль колеса должен образовывать круг, иначе в процессе движения на платформе будут возникать вертикальные вибрации [10]. В созданной модели профиль колеса описывает окружность. Полученная 3D модель роликонесущего колеса представлена на рис. 8.

Полезная модель, полученная в ходе исследования, относится к колесам транспортных средств и предназначена, преимущественно, для использования в качестве движителя мобильных платформ. Техническая задача полез-



а



б

Рис. 8. Сборка 3D роликонесущего колеса: а — изометрический вид; б — колесо в профиле



ной модели — повышение площади контакта с поверхностью и удешевление производства роликонесущих колес для платформ среднего типоразмера.

### Расчет колеса на прочность. Статический расчет

Для оценки возможной грузоподъемности конструкции на первом этапе определения характеристик изделия был произведен статический расчет роликонесущего колеса на прочность. Расчет на прочность был произведен с помощью прикладных компьютерных программ. Геометрические параметры колеса представле-

ны в табл.1. Материалы, выбранные для расчета приведены в табл. 2.

Для упрощения и уменьшения времени расчета было принято решение исключить из расчета все элементы, отсутствие которых незначительно повлияет на статический прочностной расчет.

На грань ролика действует вертикальная сила  $P=400$  Н, имитируя нагрузку 160 кг на платформу. Колесо жестко закреплено с внутренней стороны втулки, имитируя нахождение роликонесущего колеса на неподвижном валу. В результате расчета была получена эпюра распределения напряжений, изображенная на рис. 9.

Эпюра деформации представлена на рис. 10.

Таблица 1

Геометрические параметры колеса

Параметр	Значение
Диаметр колеса с учетом роликов	158 мм
Ширина колеса	64 мм
Диаметр дисков колеса	105 мм
Количество роликов	10 шт.
Контактная площадь поверхности одного ролика	0,0047 м <sup>2</sup>

Таблица 2

Материалы для элементов сборочной конструкции

Элемент	Материал
Диск колеса, крепление для ролика, втулка, стержень для ролика, ось	Листовая углеродистая сталь 1023 (SS)
Крепеж	Сталь AISI 1035 (SS)
Поверхность ролика	Полиуретан Simpack 85 A

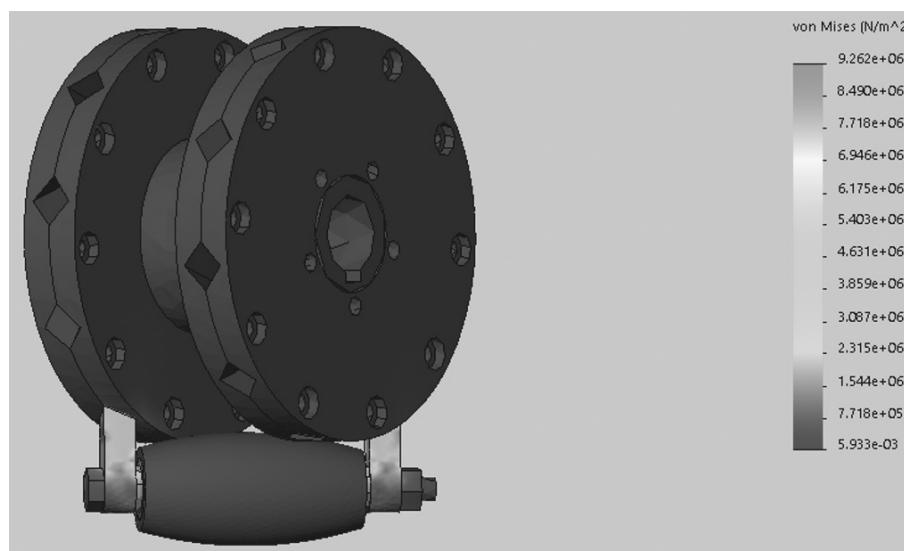


Рис. 9. Эпюра распределения напряжений в роликонесущем колесе

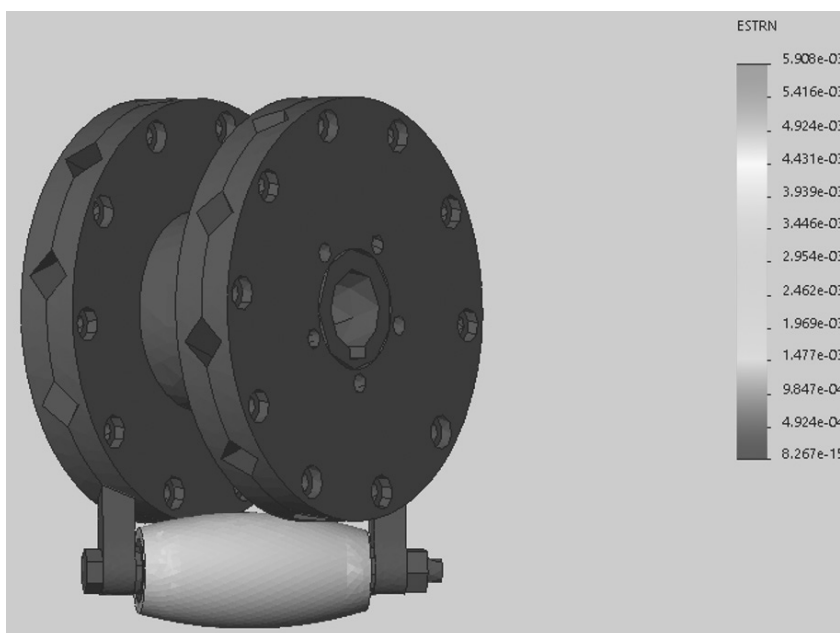


Рис. 10. Эюра деформации в роликонесущем колесе

Как видно из рисунка сильной деформации подвержен только ролик колеса. Полученное значение деформации является допустимым.

### Выводы

Задача оптимизации и унификации конструкции решена следующим образом: роликонесущее колесо состоит из комбинации парных дисков, соединённых через втулку в единый корпус. Данная конструкция отличается простотой изготовления сборочных единиц и может быть простым масштабированием изменена под любой типоразмер, в зависимости от заданной нагрузки.

В работе был произведен расчет напряжений и деформаций в конструкции. Полученные результаты можно считать удовлетворительными.

В дальнейшем планируется провести ряд прочностных расчетов с использованием прикладных программ и, в случае удовлетворительных результатов изготовить твердотельную модель колеса.

### Литература

1. Ilon B.E. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base // US Patent № 3, 876, 255. 1975.

2. Muir P., Neuman P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots // The Robotics Institute, Mobile Robot Lab; and The Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie-Meloon University. Schenley Park. — Pittsburgh. PA 15213.

3. Hendzel Z., Rykala L. Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. 2017. Vol. 22. № 1. P. 81–99.

4. Becker F., Bondarev O., Zeidis I., Zimmermann K. An approach to the kinematics and dynamics of a four-wheel mecanum wheel // Special issue of scientific journal of IFToMM «Problems of mechanics». № 2 (55). 2014.

5. Abdelrahman M., Zeidis I., Bondarev O., Adamov B., Becker F., Zimmermann K. A description of dynamics of a four-wheel mecanum mobile system as a basis for a platform concept for special purpose vehicles for disabled persons // Proc. 58th ILMENAU SCIENTIFIC COLLOQUIUM Technische Universitat Ilmenau. 08–12 September 2014.

6. Giurgiu T., Puică C., Pupăză C., Nicolescu F., Zapciu M. Mecanum wheel modeling for studying roller-ground contact issues // Proc. U.P.B. Sci. Bull. Series D. Vol. 79. Iss. 2. 2017. ISSN 1454-2358.

7. Gfrerrer A. Geometry and kinematics of the mecanum wheel / A. Gfrerrer // Proc. Computer Aided Geometric Design. 2008. Vol. 25. № 9. P. 784–791.

8. GÖLLNER M., LIU-HENKE X. Mathematical derivation of the geometry of a Mecanum-wheel for a size exact roll off on a spherical surface // Proc. 10th International Conference on Mechatronic Systems and Materials (MSM).

9. Giurgiu T., Puica C.C., Pupaza C., Nicolescu A. Mecanum wheel modeling for studying roller-ground contact issues // UPB Scientific Bulletin. Series D: Mechanical engineering. 79 (2). January 2017. P. 147–158.

10. Адамов Б.И. Влияние конструктивных особенностей меканум-колес на движение все-направленной платформы робота Kuka Youbot // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» / ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». — СПб: 2018. 443 с.

### References

1. Ilon B.E. Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base // US Patent № 3, 876, 255. 1975.

2. Muir P., Neuman P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots // The Robotics Institute, Mobile Robot Lab; and The Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie-Meloon University. Schenley Park. — Pittsburgh. PA 15213.

3. Hendzel Z., Rykala L. Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. 2017. Vol. 22. № 1. P. 81–99.

4. Becker F., Bondarev O., Zeidis I., Zimmermann K. An approach to the kinematics

and dynamics of a four-wheel mecanum wheele // Special issue of scientific journal of IFToMM «Problems of mechanics». № 2 (55). 2014.

5. Abdelrahman M., Zeidis I., Bondarev O., Adamov B., Becker F., Zimmermann K. A description of dynamics of a four-wheel mecanum mobile system as a basis for a platform concept for spacial purpose vehicles for disabled persons // Proc. 58th ILMENAU SCIENTIFIC COLLOQUIUM Technische Universitat Ilmenau. 08–12 September 2014.

6. Giurgiu T., Puică C., Pupăză C., Nicolescu F., Zapciu M. Mecanum wheel modeling for studying roller-ground contact issues // Proc. U.P.B. Sci. Bull. Series D. Vol. 79. Iss. 2. 2017. ISSN 1454-2358.

7. Gfrerrer A. Geometry and kinematics of the mecanum wheel / A. Gfrerrer // Proc. Computer Aided Geometric Design. 2008. Vol. 25. № 9. P. 784–791.

8. GÖLLNER M., LIU-HENKE X. Mathematical derivation of the geometry of a Mecanum-wheel for a size exact roll off on a spherical surface // Proc. 10th International Conference on Mechatronic Systems and Materials (MSM).

9. Giurgiu T., Puica C.C., Pupaza C., Nicolescu A. Mecanum wheel modeling for studying roller-ground contact issues // UPB Scientific Bulletin. Series D: Mechanical engineering. 79 (2). January 2017. P. 147–158.

10. Adamov B.E. Influence of the design features of the mekanum wheels on the movement of the omnidirectional platforms of the Kuka Youbot robot // Proc XX Conference of young scientists «Navigation and motion control» / SSC RF JSC «Concern «TSNII «Electropribor»» — St. Peterburg. 2018. 443 p.