

Разработка мотор-колеса с встроенным магнитно-механическим устройством сопряжения для мобильной реконфигурируемой системы МАРС

П.А. Смирнов,
м.н.с., smirnov_petr@ias.spb.su
СПИИРАН, г. Санкт-Петербурге

Рассматривается задача разработки базовой пары мотор-колес для автономной единицы мобильной реконфигурируемой системы однородных модульных роботов МАРС, отвечающей за локомоцию и содержащей дополнительное оборудование, позволяющее соединяться роботам в модульную конструкцию и формировать структуры различной степени сложности. В статье приводится обзор существующих решений мотор-колес и их классификация по группам с точки зрения передачи крутящего момента. Предлагаемое решение мотор-колеса основано на фрикционной передаче, что позволило уменьшить вес конструкции, расположить центр масс ниже основной оси и допустить установку внутри магнитно-механического устройства сопряжения в механизме.

The task of developing a base pair of dual-purpose motorized wheels for an autonomous unit of a mobile reconfigurable system of homogeneous modular robots MARS, intended both for movement and designed to install additional equipment, allowing to connect into a modular design and form structures of various degrees of complexity is considered. The article provides an overview of existing motorized wheel solutions and their classification into groups in terms of torque transmission. The proposed solution of motorized wheel is based on friction gear, which allowed reducing the weight of the structure, locating the center of mass below the main axis and allowing installation inside the magnetic-mechanical interface device in the mechanism.

1. Актуальность решаемой задачи

Среди современных прототипов малогабаритных модульных роботов большее развитие получили цепевидные, встроенные модули которых находятся в постоянном соединении и не предусматривают возможности самостоятельного передвижения. В результате выход из строя одного из модулей цепи приводит к снижению либо полной утрате работоспособности всего робота. Эту проблему решает разрабатываемый полнофункциональный автономный модульный робот, обладающий, в том числе, способностью самостоятельно передвигаться, что дает обеспечивает гибкость и реконфигурируемость модульного робота с возможностью перестроения структуры, замены вышедших из строя модулей. В работе представлены разработанные элементы конструкции и принципы функционирования базы мотор-колес автономной единицы модульного робота МАРС, рассчитанных на установку дополнительного оборудования в виде магнитно-механического устройства сопряжения [1] и набора датчиков, необходимого для навигации и локализации модулей относительно друг друга при формировании структуры.

2. Обзор существующих решений

2.1. Актуальность использования мотор-колеса

В последние несколько лет область применения различного вида систем мотор-колес как в автомобилях, так и специализированном транспорте непрерывно расширяется. В случае использования системы мотор-колесо в автомобиле, можно выделить ряд существенных преимуществ, а именно:

- отсутствие потери мощности при передаче крутящего момента от двигателя на колеса, которое происходит в трансмиссии;
- Компактное размещение тягового двигателя непосредственно внутри колеса, что в некоторых случаях является единственно возможным вариантом решения;
- Возможность преобразования кинетической энергии в электрическую методом рекуперативного торможения;
- Получение высокого КПД.

2.2. Модель мотор-колеса



рис. 1. Мотор колесо [3]

Мотор-колесо (рис. 1) – это конструкция, состоящая из колеса, встроенного в него тягового электродвигателя, силовой передачи и тормозного устройства.

Вал якоря электродвигателя через редуктор передаёт вращение на внутренний зубчатый венец ведущего колеса. Вращается мотор-колесо в подшипнике, установленном в поворотной цапфе или в кронштейне, подвешенном к раме [2].

2.3. Основные разновидности мотор-колеса

В настоящее время существуют различные варианты размещения двигателя внутри колеса. Если рассматривать мотор-колесо с точки зрения передачи крутящего момента непосредственно с ротора электродвигателя на обод колеса и обратно, то в таком случае мотор-колеса условно можно подразделить на следующие группы:

- Редукторные мотор-колеса (рис. 2, а);
- Безредукторные мотор-колеса (рис. 2, б).



рис. 2. а) редукторное мотор колесо [4], б) безредукторное мотор-колесо [5]

Обычно в мотор-колесах применяется редуктор, который преобразует высокую угловую скорость вращения входного вала электродвигателя в более низкую скорость вращения на выходном валу. В результате, значительно повышается крутящий момент, создаваемый двигателем. Редуктор, который преобразует высокую угловую скорость в более низкую, называют демультпликатором.

В мотор-колесах традиционно используется один из классов механических редукторов — планетарный (рис. 2, а). Основе такого редуктора составляет планетарная передача с закреплённым водилом [6]. Мотор-колесо с редуктором и без редуктора имеет один и тот же принцип действия. В неподвижном статоре создается вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с постоянными магнитами ротора, заставляет его крутиться. Статор изготавливается из пластин электротехнической стали, и похож на многолучевую звезду, на лучах которой намотаны обмотки. В момент прохождения по обмоткам электрического тока, лучи работают как электромагниты, притягивающие к себе постоянные магниты, расположенные на роторе, тем самым, обеспечивая его вращение. Для определения этого момента в статоре установлены датчики Холла, определяющие положение ротора относительно статора. Реагируя на магнитное поле постоянных магнитов, они подают электрический сигнал, поступающий на контроллер, подающий импульсы напряжения на обмотки статора для образования магнитного поля. За полный цикл происходит вращение ротора на один оборот.

Мотор-колеса, в которых отсутствует механическая передача и в случаях, когда вращающийся ротор напрямую связан с ободом колеса, называются безредукторные мотор-колеса или колеса с прямым приводом. Статор с обмотками возбуждения жестко закреплен на оси колеса. Ротор, на котором располагаются постоянные магниты, расположен снаружи статора. Ротор в этом случае крепится к валу колеса с помощью подшипников. Подшипники в данной конструкции являются единственными трущимися деталями, которые подвержены износу. Это обуславливает простоту и надежность конструкции мотор-колеса с прямым приводом.

Среди последних разработок безредукторных колес можно выделить:

- Мотор-колесо Д.А. Дуюнова (рис 3, а);
- Мотор-колесо В.В. Шкондина (рис. 3, б).

Д.А. Дуюнов использовал за основу своего мотор-колеса обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутыми кольцами (рисунок 3, а). При этом отпала необходимость в использовании дорогостоящих редкоземельных постоянных магнитов. Главной особенностью разработки является смешанная обмотка возбуждения статора, которая называется «Славянка» [7]. Ротор, применяемый в двигателе, изготовлен из меди, расположен снаружи статора, состоит из стержней и двух замыкающих колец, припаянных к стержням. В работе [4] указано, что обмотка состоит из двух взаимозависимых трехфазных обмоток, соединенных одна в звезду, другая - в треугольник при соотношении чисел их витков, равном 3, причем на каждую фазу приходится равное число пазов, фазные катушки уложены в пазы так, что результирующие векторы индукции магнитных потоков соседних фаз (то есть индуцируемых следующими друг за другом по окружности статора фазными катушками) равны по величине 17 амплитуды и образуют между собой угол в 30 эл. градусов. Устройство управления содержит р контроллеров, один из которых может быть ведущим, другие - ведомыми. При этом каждая пара полюсов запитана от отдельного контроллера.



рис. 3. а) мотор-колесо Д.А. Дуюнова [7], б) мотор-колесо В.В. Шкондина [8]

Основой системы мотор-колеса В.В. Шкондина (рис. 3, б) является импульсно-инерционный электродвигатель с внешним ротором. Сам статор состоит из кругового магнитопровода на котором закреплено четное количество постоянных магнитов с одинаковым шагом. Ротор отделяется от статора воздушным зазором и на нем устанавливается четное число обмоток возбуждения, которые расположены попарно напротив друг друга и имеют по две катушки с последовательно встречным направлением обмотки.

В работе [8] показано, что на корпусе статора закреплен распределительный коллектор, на котором по окружности расположены токопроводящие пластины. Пластины должны быть соединены с учетом чередования полярности с постоянным источником тока. Токосъемники установлены таким образом, чтобы была возможность контакта с пластинами коллектора, причем каждый из токосъемников должен быть подключен к одноименному выводу обмоток соответствующих обмоток возбуждения статора. Каждая обмотка возбуждения имеет по две катушки с последовательно встречным направлением обмоток, причем обмотки катушек смежных электромагнитов соединены последовательно, а выводы обмоток противоположных электромагнитов, не подключенные к токосъемникам, соединены между собой.

Количество постоянных магнитов статора, равное n и количество электромагнитов ротора равное m , подбирают таким образом, чтобы они удовлетворяли соотношениям:

$$n = 10 + 4k, \quad (1)$$

где k — целое число, принимающее значения 0, 1, 2, 3 и т.д.

$$m = 4 + 2L, \quad (2)$$

где L — любое целое число, удовлетворяющее условию $0 \leq L \leq k$.

В результате, использования такого соотношения числа обмоток возбуждения статора и соотношения постоянных магнитов, их взаимное расположение и используемая схема коммутации мотор-колеса, приводит к резонансу токов, протекающих через обмотки возбуждения, которые диаметрально расположены относительно друг друга. Как следствие уменьшаются скачки напряжения при пуске и разгоне электродвигателя. Также такая конструкция позволяет максимально эффективно рекуперировать энергию торможения за счет возникновения противо-ЭДС на холостом ходе. При такой схеме конструкции имеется возможность исключить щёточноколлекторный узел и взамен установить использовать силовые ключи. Для этого используются тиристоры или силовые транзисторы с изолированным затвором. Такая модернизация существенно повысит надежность и повысит КПД установки. Снизит шум и вибрацию, а также уберет необходимость периодической замены трущихся частей механизма.

3. Разработка мотор-колеса

Новизна разрабатываемой автономной единицы модульного робота состоит в применении пары мотор-колес с фрикционной передачей, базового блока с поворотным приводом, ось которого стоит перпендикулярно осям мотор-колес. Внутри базового блока такого робота установлен осевой сервопривод, отвечающий за поворот на 90° в сторону от главной оси движения. При такой конструкции робот способен совершать отклонение осей ведомого мотор-колеса в пределах 180° . На рисунке (рис. 4) показана базовая модель модульного робота в положении, в котором он может передвигаться, используя мотор-колеса. Внутри каждого мотор-колеса установлен сервопривод, способный как выполнять повороты на заданный угол, так и вращаться на 360° вокруг собственной оси. Это позволит каждому отдельно взятому блоку-модулю робота перемещаться быстрее, чем аналоги, разворачиваться на месте с нулевым радиусом разворота, а также позволит без разъединения изменять структуру, организованную из таких блоков. Сервоприводы мотор-колес так же отвечают за позиционирование двух платформ относительно друг друга.

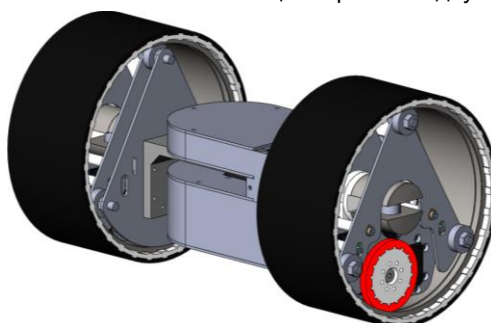


рис. 4. Базовая модель автономной единицы модульного робота MAPC

Разработаны две схемы расположения коннекторов блока-модуля «АВВВ» и «ААВВ», А – активная часть устройства с магнитным контуром, В – ответная часть магнитно-механического коннектора [1], отличающиеся друг от друга особенностями реализации и возможностями формирования структурных образований. На рисунке ниже (рис. 5) показана базовая схема модуля, показывающая расположение сервоприводов мотор-колёс, осевого сервопривода базового блока и одного из двух наборов коннекторов. Из схемы Конечное количество степеней свободы определяется количеством модулей в образуемой структуре и ее конфигурацией.

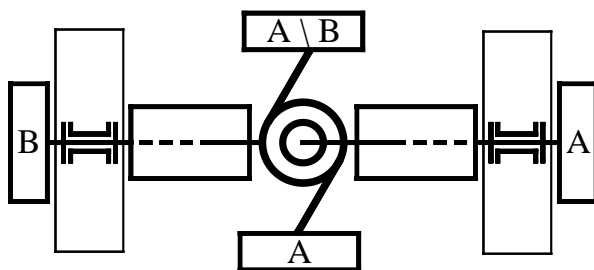


рис. 5. Схема основных элементов автономной единицы блока-модуля

Конструкция мотор-колес для коннекторов А и В различна, так как В – колесо ведомое и его конструкция изначально не включает в себя массивных и тяжелых элементов, для снижения нагрузки на осевой сервопривод во время движения. Основа коннектора В-типа – стальной диск специальной формы для уменьшения люфтов боковых сдвигов и нагрузок, приходящих на магнитный контур, выступающий как контактная площадка для активной части магнитно-механического соединения. В колесе с коннектором А-типа находится активный магнитно-механический коннектор, основной магнитный контур. Мотор-колесо А-типа фиксировано относительно базового блока, не перемещается вокруг оси сервопривода базового блока модуля для оптимальности кинематической схемы и системы управления.

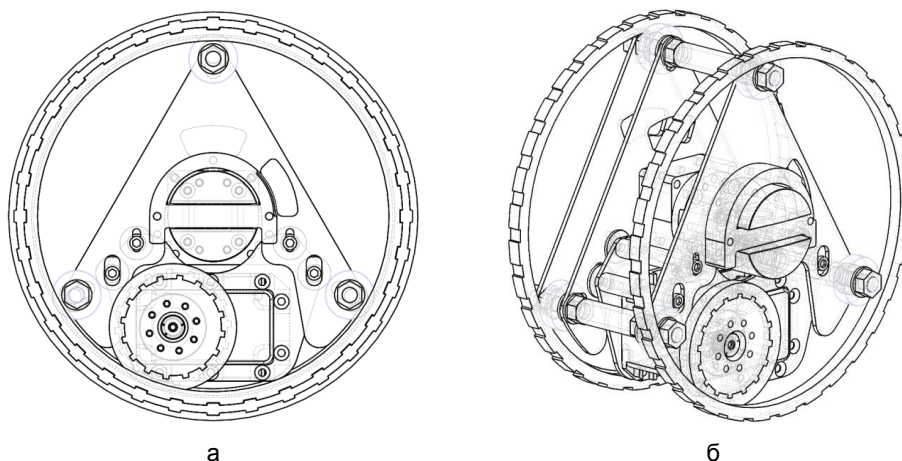


рис. 5. Каркасное представление основных элементов мотор-колеса автономной единицы блока-модуля

Движителем в конструкции мотор-колеса является привод Dynamixel MX-28, выбранный в качестве основы из-за двойного режима работы, как обычный двигатель постоянного тока и как сервопривод с обратной связью, что необходимо для построения модульной структуры при совмещении поверхностей устанавливаемого на центральной оси колеса устройства сопряжения. Сервопривод установлен в регулировочную каретку (рис. 6), зажимаемую в пазах рамы для плотного контакта с поверхностью обода колеса. Также рама мотор-колеса стоит на подшипниках, установленных в пазах пластин рамы обода колеса для равномерного прижима, исключения деформации обода и снижения проскальзывания деталей при вращении колеса, каждый подшипник можно отрегулировать отдельно для более плотного прижима, по результатам проведённых экспериментов по работе мотор-колеса для следующей итерации модульного робота конструкцией предусматриваются натяжители и упорные пружины, обеспечивающие постоянный и равномерный прижим к внутреннему ободу. Внешний диаметр колеса равен 0,13 м при диаметре внутреннего обода 0,12 м.

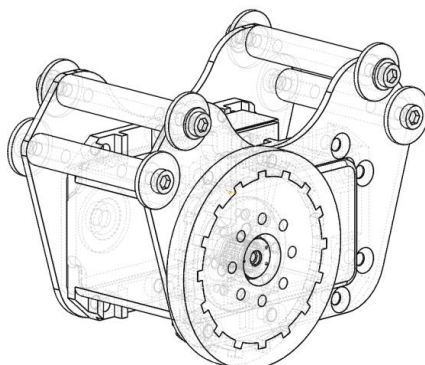


рис. 6. Каретка с сервоприводом, устанавливаемая в раму мотор-колеса

Конструкция разработанного мотор-колеса позволила сместить центр масс модульного робота MAPC на 0,03 м ниже центральной оси колёсной базы, что даёт стабилизацию автономной единицы модульного робота при движении.

Вывод

В работе рассмотрены основные разновидности мотор-колес и актуальные отечественные разработки, проанализированы их конструктивные особенности. Предложена модель мотор-колеса, основанная на фрикционной передаче. Одним из главных достоинств предложенного мотор-колеса является расположение центра масс (ниже основной оси), которое позволило установить внутри мотор-колес магнитно-механическое устройство сопряжения. Такое решение даёт стабилизацию автономной единицы MAPC при движении. Внутри мотор-колеса установлен сервопривод, способный как выполнять повороты на заданный угол, так и вращаться на 360° вокруг собственной оси. Мотор-колесо фиксировано относительно базового блока, не перемещается вокруг оси сервопривода базового блока модуля для улучшения кинематической схемы и системы управления. После завершения прототипирования модульного робота будет проведена экспериментальная проверка и последующее внедрение в задачах роботизации промышленности, сельского хозяйства и других отраслях [11-14].

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (16-29-04101-офи_м).

Литература

1. Павлюк Н.А., Крестовников К.Д., Пыхов Д.Э., Мобильная автономная реконфигурируемая система // Проблемы региональной энергетики. – 2018. – №1(36). – С. 125-135. DOI: 10.5281/zenodo.1217296
2. Ишлинский А.Ю. Мотор-колесо // Политехнический словарь / — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Советская энциклопедия, стр. 656, 1989.
3. ALP Technologies [Электронный ресурс] URL: <http://www.alp-technologies.com> [Дата обр.: 26.09.2018].
4. ANANDALAL ELECTRIC [Электронный ресурс] URL: <https://anandalalelectric.com> [Дата обр.: 26.09.2018].
5. Industrie & Technologies [Электронный ресурс] URL: <https://www.industrie-techno.com> [Дата обр.: 26.09.2018].
6. Бойко Л.С., Высоцкий А. З., Галиченко Э. Н. и др., Редукторы и мотор-редукторы общемашиностроительного применения: Справочник // М.: Машиностроение. – 1984. — С. 247.
7. Агриков Ю.М., Дуюнов Е.Д., Дуюнов Д.А., Блинов В.Л., Яковлев И.Н. - Малошумный энергоэффективный электропривод. Российский патент № 2568672.
8. Шкондин В.В. Асимметричный импульсный однофазный электродвигатель с частотным преобразователем который стоит купить. Российский патент № 2285997.
9. Бокарев А.И. Перспективы использования индивидуального регулируемого силового электропривода в системах активной безопасности // Исследования, конструкции, технологии. – 2015. – №1(90). – С. 21-25.
10. Мерекекызы А. Легковой электромобиль с мотор-колесной конструкцией // III российская молодежная научная школа-конференция «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи». – 2015. –С. 125-127.
11. Павлюк Н.А., Будков В.Ю., Бизин М.М., Ронжин А.Л. Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174). – С. 227-239.
12. Нго К.Т., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2017. – № 95. – С. 11.
13. Ватаманюк И.В., Панина Г.Ю., Ронжин А.Л. Реконфигурация пространственного положения роя роботов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2015. – № 58. – С. 285-305.
14. Черноусько Ф.Л., Ермолов И.Л., Афанасьев Р.А. Основные направления роботизации земледелия // Плодородие. – 2018. – № 1 (100). – С. 48-53.