

EDN: PRWVDF

УДК 629.7.027.2:62–23:621.83

Methods for Increasing the Locomotion Characteristics of the Chassis of Mobile Robots

Dmitrij S. Kostromin*,
Aleksandr A. Truts and Petr A. Loshitsky
*Central Research and Development
Institute of Robotics and Technical Cybernetics
St. Petersburg, Russian Federation*

Received 02.11.2022, received in revised form 15.11.2022, accepted 20.12.2022

Abstract. This paper presents options for organizing the chassis of mobile robots (MR), as well as possible ways to improve the characteristics of the chassis of a mobile robot in terms of their patency on non-deterministic surfaces.

The use of robotics and robotic complexes is currently widespread in various fields of science and technology related to equipment maintenance, transportation of objects, monitoring of the state of systems, etc. One of the main representatives of robotics involved in these processes are MR, which today can have different functionality. MR components are an information-logical control system, sensors, actuators, a power supply system and a chassis with a propulsion unit. The chassis and the propeller used largely determine both the design of the MR and its functionality, the main of which is the ability to move in a non-deterministic environment and adaptability to difficult traffic conditions. To date, there is a wide variety of options for organizing the chassis of the MR, each of which has its own characteristics of work, advantages and disadvantages.

This article is devoted to the issue of improving the locomotive characteristics of the MR chassis. The tasks to be solved are the consideration of options for organizing the MR chassis and the consideration of possible ways to improve the locomotion characteristics of the selected variant of the MR chassis.

Keywords: mobile robot chassis, planetary gearbox, gear shifting mechanism.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Task for 2022 No. 075-01623-22-01 «Development of a drive module of increased radiation resistance with a variable gear ratio and the use of an electromagnetic coupling» (FNRG-2022-0024, registration number 1021101316166-9-2.2.2).

Citation: Kostromin, D.S., Truts, A.A., Loshitsky, P. A. Methods for increasing the locomotion characteristics of the chassis of mobile robots. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(1), 63–80. EDN: PRWVDF



Способы повышения локомотивных характеристик шасси мобильных роботов

Д. С. Костромин, А. А. Трутс, П. А. Лошицкий

*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский
институт робототехники и технической кибернетики
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

Аннотация. В данной статье представлены варианты организации шасси мобильных роботов, а также возможные пути улучшения характеристик шасси мобильного робота (МР) в части их проходимости по недетерминированным поверхностям.

Применение робототехники и робототехнических комплексов в настоящее время получило широкое распространение в различных областях науки и техники, связанных с обслуживанием оборудования, транспортировкой предметов, контролем состояния систем и т.д. Одним из основных видов робототехники, участвующих в данных процессах, являются МР, которые на сегодняшний день могут обладать разным функционалом. Компонентами МР являются информационно-логическая система управления, датчики, исполнительные механизмы, система электропитания и шасси с двигателем. Шасси и примененный двигатель во многом определяют как конструктивный облик МР, так и его функциональные возможности, главная из которых – способность к передвижению в недетерминированной среде и приспособляемость к сложным условиям движения.

На сегодняшний день существует большое разнообразие вариантов организации шасси МР, каждый из которых имеет свои особенности работы, достоинства и недостатки.

Данная статья посвящена вопросу повышения локомотивных характеристик шасси МР.

Решаемыми задачами являются рассмотрение вариантов организации шасси МР и определение возможных путей улучшения локомотивных характеристик выбранного варианта шасси МР.

Ключевые слова: шасси мобильного робота, планетарный редуктор, механизм переключения передач.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания на 2022 год № 075-01623-22-01 «Разработка приводного модуля повышенной радиационной стойкости с изменяемым передаточным числом и использованием электромагнитной муфты» (FNRG-2022-0024, регистрационный номер 1021101316166-9-2.2.2).

Цитирование: Костромин Д.С. Способы повышения локомотивных характеристик шасси мобильных роботов / Д.С. Костромин, А.А. Трутс, П.А. Лошицкий // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(1). С. 63–80. EDN: PRWVDF

Варианты организации шасси МР

В настоящее время существует большое разнообразие вариантов построения шасси МР. Основными вариантами организации шасси МР являются гусеничные или колесные базы, каждая из которых может быть как жестко фиксированной, так и иметь функции адаптации к условиям передвижения.

В случае с шасси на гусеничном ходу, пример которого представлен на рис. 1, приведение в движение МР осуществляется за счет зацепления гусеничных лент по поверхности движения и перематывания лент ведущим колесом. Гусеничное шасси за счет своей конструктивной

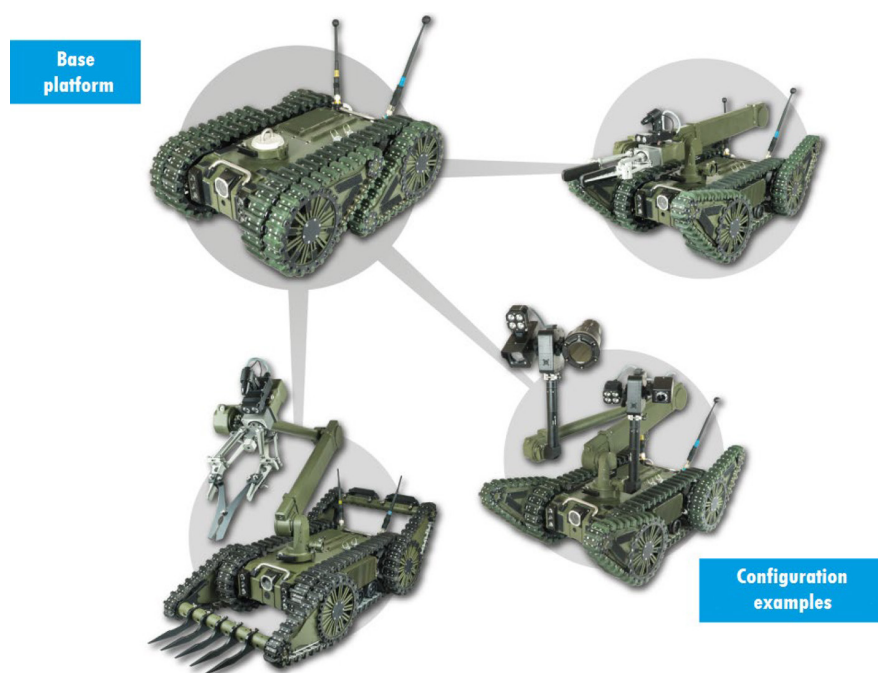


Рис. 1. Пример МР на гусеничном шасси [2]

Fig. 1. An example of an MR on a tracked chassis [2]

организации имеет возможность управления каждой гусеницей независимо от другой. Гусеничные шасси обеспечивают более низкое удельное давление и более высокие тяговые характеристики на слабонесущих грунтах, что является их достоинством, но по конструктивному исполнению они значительно сложнее, чем колесные шасси и, как следствие, требуют организации существенно большего объема выполняемых работ в рамках проведения технического обслуживания для поддержания своих функциональных характеристик.

Колесное шасси, пример которого представлен на рис. 2, приводит в движение МР за счет зацепления парой колес или же всеми колесами по поверхности движения. Наибольшее распространение получили варианты построения колесного шасси МР на основе четырех- и шестиколесной схем. Колесное шасси за счет своей конструктивной организации имеет возможность управления каждым колесом независимо от другого. Как правило, при построении колесного шасси применяется схема, когда на каждое колесо устанавливается свой собственный приводной механизм, а управление движением осуществляется за счет изменения скорости вращения колес. Достоинством колесного шасси является его простота конструкции при должных характеристиках проходимости, скорости, надежности и ремонтпригодности. Но такой тип шасси имеет и недостатки, такие как низкая проходимость колеса по мягким и рыхлым грунтам.

Также существуют варианты построения шасси на основе шаговой базы, пример которой изображен на рис. 3, которое представляет собой платформу с установленными на ней опорными конструкциями. В таком случае передвижение МР осуществляется за счет синхронизированной поступательной перестановки опорных конструкций. Достоинством данного типа



Рис. 2. Пример МР на колесном шасси [3]

Fig. 2. An example of an MR on a wheeled chassis [3]



Рис. 3. Пример МР на шаговом шасси [4]

Fig. 3. An example of an MR on a stepping chassis [4]

шасси является его большая проходимость по сложным участкам местности, но сложность организации и малая скорость передвижения, по сравнению с колесной или гусеничной платформой, накладывают ряд ограничений на применение такого шасси.

Возможные пути повышения локомотивных характеристик шасси

Для каждого типа шасси могут применяться различные способы улучшения их локомотивных характеристик. По мнению авторов, методы улучшения проходимости МР можно сгруппировать по трем направлениям, которые включают в себя варианты, связанные с увеличением мощности двигателей, перегружением двигательной установки при движении МР и конструктивной адаптации. Рассмотрим эти варианты повышения локомотивных характеристик шасси.

Вариант увеличения мощности двигателей подразумевает повышение скорости и развиваемых моментов при передвижении МР за счет использования двигателей с большими габаритными размерами и энергопотреблением. Данный метод применяется в тех случаях, когда ограничения, накладываемые функционалом МР, позволяют безболезненно увеличивать размеры МР до достижения локомотивных характеристик, улучшающих проходимость МР. Достоинство данного метода – его простота и отсутствие необходимости введения дополнительных конструктивных решений. Недостатком является применение двигателей с большими размерами и существенно большим энергопотреблением, что приводит к значительному увеличению всей двигательной установки. Также из недостатков можно отметить повышение сложности управления ввиду увеличенной мощности двигателей, что в случае возникновения ошибки управления может приводить к нештатным ситуациям – например, пробуксовка колес МР или опрокидывание МР при начале движения.

Вариант использования двигателя с перегружением по потребляемой и выходной мощности за пределами его расчетных функциональных режимов крайне сильно влияет на его надежность и ресурс, что может приводить к частым поломкам или полному выходу из строя механизма. Перегрузка, как правило, применяется в заранее известных случаях, допустим, когда необходимо преодолеть единичное препятствие с габаритными размерами, превышающими номинальные технические возможности МР, либо при применении устройств с непродолжительным режимом работы.

Вариант конструктивной адаптации для увеличения проходимости МР подразумевает применение схем с возможностью пассивной или активной адаптации к поверхности сложного рельефа [5; 6; 7].

Пассивный вариант адаптации подразумевает введение в конструкцию постоянных элементов, улучшающих характеристики шасси, например, применение колеса повышенной проходимости, применение гусениц с повышенной прочностью. Достоинством пассивной адаптации является большая надежность по сравнению с методом активной адаптации за счет отсутствия необходимости коммутации элементов, улучшающих локомотивные характеристики шасси. Недостатками являются меньшая вариативность способов увеличения локомотивных характеристик шасси и более жесткая привязка к конкретному исполнению шасси МР.

Активный вариант адаптации подразумевает введение в конструкцию коммутируемых механизмов, которые не работают постоянно, а подключаются в работу по необходимости,

например, применение дополнительных колес для стабилизации МР при езде под уклоном, применение шасси с изменяемой геометрией. Достоинства этого метода – большое разнообразие вариантов адаптации различных конструктивных исполнений шасси МР и возможность коммутации элементов, повышающих характеристики шасси МР только при возникновении соответствующих условий, исключая при этом негативный эффект от них, например, эффект опрокидывания от пассивной подпружиненной подвески при движении на крутом уклоне и перераспределении веса между осями МР. Недостатком же является меньшая надежность по сравнению с методом пассивной адаптации и большая сложность управления МР.

Примеры шасси с элементами конструктивной адаптации приведены на рис. 4 и 5.

Одним из вариантов конструктивной адаптации является организация движителя по типу безредукторного электромеханического привода [10], представляющего собой электрическую синхронную бесколлекторную машину обращенной конструкции с внешним ротором. Такая адаптация позволяет работать движителю шасси МР как в двигательном режиме, так и в генераторном режиме с возможностью рекуперации накапливаемой энергии.

Стоит отметить, что немалое применение получили комбинированные варианты шасси, а также реконфигурируемые системы, пример которых приведен на рис. 6, и многомодульные сочлененные структуры, являющиеся гибридными вариантами вышеописанных шасси МР на основе гусеничной, колесной и шаговой баз. Гибридные схемы построения позволяют совместить достоинства и уменьшить те или иные недостатки шасси МР.

Из рассмотренного выше материала можно отметить, что конструктивная адаптация имеет преимущества перед наращиванием мощности движителей и использованием движителей, перегруженных по потребляемой мощности, так как конструктивная адаптация не приводит к значительному уменьшению надежности и ресурса движительной установки по сравнению с использованием движителей, перегруженных по потребляемой мощности, и не способствует значительному увеличению энергопотребления по сравнению с использованием двигателей повышенной мощности.

Одним из вариантов конструктивной адаптации также является изменение крутизны механической характеристики движителей, т.е. адаптация работы движителей к местности, по которой передвигается МР. За счет возможности изменения передаточного числа редуктора появляется возможность работы шасси МР в нескольких режимах, например в «скоростном»

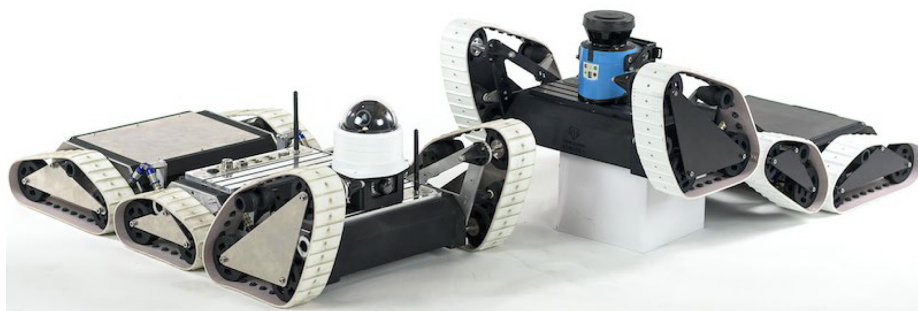


Рис. 4. Робот Transcend Robotics ART13 [8]

Fig. 4. Robot Transcend Robotics ART13 [8]



Рис. 5. Прототип марсохода «ЭкзоМарс» [9]

Fig. 5. Prototype of the «ExoMars» rover [9]



Рис. 6. Пример реконфигурируемой системы шасси MR TM «Торнадо» разработки МГТУ им. Баумана [11]

Fig. 6. An example of a reconfigurable chassis system MR TM “Tornado” developed by Bauman Moscow State Technical University [11]

режиме, когда МР требуется большая скорость его передвижения, и в «моментном», когда МР не требуется высокая скорость передвижения (например, подъем в гору), а требуется больший крутящий момент. Применение такого типа адаптации шасси может быть реализовано в любом типе шасси с сохранением основных уже реализованных конструктивно-технических решений и позволяет добиться улучшенной проходимости при достаточной простоте конструкции.

Широкого применения в МР такой вариант адаптации не получил. По мнению авторов, это связано с отсутствием готовых решений на рынке и большей конструктивной сложностью по сравнению с однорежимными редукторами. Перспективность применения адаптивного редуктора довольно широка как в колесном шасси, так и в гусеничном и шаговом шасси, например в составе приводных движителей, так как позволяет существенно расширить диапазоны регулирования скорости и момента. Наибольшее распространение редуктора с изменяемым передаточным числом получили в автомобилестроении в виде коробок передач.

Наиболее распространенные способы изменения передаточного числа

Рассмотрим способы изменения передаточного числа на примере различных типов коробок передач, работающих в автоматическом режиме. Таковыми коробками передач являются автоматическая коробка передач (АКП), роботизированная коробка передач (РКП) и бесступенчатая коробка передач (CVT – Continuously Variable Transmission).

АКПП представляет собой многоступенчатый планетарный редуктор на основе цилиндрической передачи. Использование планетарного механизма в АКП очень удобно в том отношении, что для управления его передаточным числом и направлением вращения выходного вала, осуществляемого за счёт торможения отдельных частей планетарной передачи, можно использовать сравнительно небольшие и притом постоянные усилия с задействованием в качестве исполнительных механизмов фрикционов и ленточных тормозов. Кроме того, отсутствует необходимость выравнивать скорости отдельных элементов, так как все шестерни планетарной передачи находятся в постоянном зацеплении [12]. Изменение передаточного числа в АКП происходит за счет работы гидротрансформатора и гидравлической муфты, которые за счет нагнетания масляного давления по соответствующим каналам изменяют расположение фрикционов. Реализованные в составе АКПП технические решения нецелесообразно применять в составе движителей МР по причине избыточности его функционала. Применяемые в составе движителей МР электродвигатели в отличие от двигателей внутреннего сгорания (ДВС) имеют диапазон регулирования скоростей от нуля до максимального значения, а значит, им не требуется гидротрансформатор в составе механизма переключения передач. Кроме того, такие электродвигатели, как правило, имеют малоинерционный ротор, что позволяет им существенно быстрее менять скорость их вращения по сравнению с ДВС и, значит, им в меньшей степени требуется многоступенчатое переключение передач для поддержания плавности движения МР.

РКП представляет собой механическую коробку передач (МКП), в которой в качестве исполнительных механизмов для изменения передаточного числа используются линейные актуаторы – сервопривода, выполненные чаще всего как шаговый электродвигатель с редуктором и исполнительным механизмом. Достоинствами данной коробки передач являются ее ресурсоемкость и надежность. Из недостатков можно отметить актуаторы, которые требуют периодической адаптации (коррекции) данных управления. Данное техническое решение трудно-

реализуемо в составе движителей МР, так как требует установки дополнительного линейного актуатора и системы управления его работой, а также реализации функции узла сцепления для обеспечения зацепления перемещаемых зубчатых колес.

Бесступенчатая коробка передач включает в себя механическую часть, которая состоит из двух раздвижных конусных шкивов и металлического клинового ремня. Передаточное число трансмиссии изменяется за счет сдвигания и раздвигания шкивов, которые осуществляются за счет электрогидравлического блока. Из достоинств можно отметить плавность хода и малые габаритные размеры по сравнению с АКП и РКП. Недостатком являются ограничения при передаче крутящего момента на краях диапазона регулирования скоростей, так как при больших значениях момента может возникать проскальзывание ремня из-за малой площади контакта на приводном шкиве, что приводит к сильному износу элементов ременной передачи [13; 14]. Данное техническое решение имеет значительные негативные стороны при реализации в составе МР, так как при движении по пересеченной местности на малых скоростях и больших моментах имеет невысокую надежность, а также требует реализации дополнительного линейного актуатора в составе движителей МР.

Исходя из вышеизложенного, по мнению авторов, наиболее удобным вариантом для реализации в составе МР является способ изменения передаточного числа, используемый в АКП, из-за удобства управления передаточным числом и отсутствия необходимости выравнивания скорости отдельных элементов планетарного редуктора между собой. Также ввиду отсутствия необходимости устанавливать гидротрансформатор и обеспечивать многоступенчатость, благодаря возможности широкой регулировки электродвигателя по скорости и крутящему моменту в малых интервалах времени, появляется возможность сокращения числа ступеней и существенного уменьшения габаритных размеров механизма изменения передаточного числа.

Возможные способы изменения передаточного числа планетарного редуктора

Так как в основе механизма изменения передаточного числа принят принцип, реализованный в АКПП (торможения отдельных частей планетарного редуктора), то сначала рассмотрим состав планетарного редуктора.

Основной состав конструкции планетарных редукторов на основе цилиндрической передачи, представленный на рис. 7, включает в себя солнечную шестерню, планетарные шестерни (сателлиты) и коронную шестерню (эпицикл). Также в состав планетарного редуктора входит водило, которое обеспечивает жесткую фиксацию сателлитов относительно друг друга. В планетарных редукторах опорное звено, в роли которого могут выступать солнечная шестерня, эпицикл или водило, всегда заблокировано на корпус редуктора. При этом в зависимости от того, какая шестерня является ведущей, а какая ведомой, для любой трёхзвенной планетарной передачи возможны шесть вариантов передаточных отношений, три из которых могут применяться для редукторов (передаточное отношение больше единицы) и три для мультипликаторов (передаточное отношение меньше единицы) [15; 16]. Таким образом, фиксация тех или иных составных частей планетарной передачи позволяет менять передаточные отношения, не выводя шестерни из зацепления. Для этого могут использоваться тормоза, блокировочные фрикционы, обгонные и управляющие муфты. При необходимости большей вариативности в части передаточных чисел редуктор делают ступенчатым.



Рис. 7. Планетарный редуктор на основе цилиндрической передачи [17]

Fig. 7. Planetary gearbox based on spur gear [17]

Функциональная реализация тормозов для изменения передаточного числа может быть различной, основными вариантами могут быть электромагнитный, механический и гидравлический тормоза. Электромагнитный тормоз обеспечивает сжатие элементов трения за счет создания магнитного поля, в механическом тормозе усилие создается рычажной системой или, например, винтовой парой, а в гидравлическом тормозе усилие сжатия передается посредством гидравлической жидкости. Основным недостатком применения тормозов является необходимость внедрения в конструкцию дополнительного узла, а также отвод тепла, величина которого определяется исходной кинематической энергией затормаживаемого тела.

При применении специальных фрикционных покрытий коэффициент трения повышается, но такие покрытия, как правило, требуют применения охлаждающих жидкостей, так как при сильном нагреве могут терять свои свойства. Существуют фрикционные покрытия, например, на основе асбеста, которые не требуют применения охлаждающих жидкостей, но в процессе работы как побочный продукт образуется абразив, что не позволяет применять данное решение повсеместно.

При применении в механизме изменения передаточного числа наиболее перспективными выглядят электромагнитные тормоза, по причине того, что они не требуют использования дополнительных механизмов в виде рычажной системы или магистрали высокого давления с маслостанцией. Недостатком электромагнитных тормозов являются существенно большие массогабаритные характеристики по сравнению с аналогами при создании больших тормозных моментов, так как вся энергетика для создания соответствующих усилий вырабатывается внутри электромагнитов, в отличие от гидравлических или механических тормозов. Так как в большинстве двигателей МР не требуется создания значительных моментов, за счет применения редукторов, этот недостаток не является существенным.

Блокировочные фрикционы получили широкое применение в автоматических коробках передач автомобилей. Такие фрикционы представляют собой набор колец, между которыми находятся прокладки из промасленной бумаги. Управление чаще всего осуществляется за счет

управляющей муфты, которая работает в связке с гидротрансформатором. Возможны и другие варианты организации управления, например на основе электромагнитной муфты, но тем не менее это требует организации отдельного узла, который увеличивает массу и габариты редуктора.

Обгонная муфта представляет собой механическое устройство, основная задача которого – предотвращение передачи крутящего момента к ведущему валу от ведомого в моменты, когда ведомый вал начинает вращаться более быстро [18]. Наибольшее распространение получили роликовые и храповые муфты. Обгонная муфта имеет такие достоинства, как автоматическая коммутация механизма и простота конструкции, но также она имеет и ряд недостатков, таких как невозможность регулировки, строгая соосность ведущего и ведомого валов и повышенная точность изготовления. В случае же с храповыми муфтами дополнительно накладываются ограничения применения в передачах с большими скоростями, так как зацепление в таком механизме происходит в режиме ударного нагружения.

По мнению авторов, для фиксации элементов планетарной передачи при изменении передаточного числа в составе движителей МР наилучшим образом подойдут электромагнитные тормоза, так как они могут быть выполнены в составе движителей МР функционально завершенными модулями с реализацией простого однозначного управления.

Для передачи крутящего момента вместо фрикционных покрытий предлагается использование муфт с телами качения (шариками). Тела качения, находясь под внешней нагрузкой F , обеспечивают передачу момента, фиксируясь в конусных углублениях, а при превышении момента сохраняют возможность взаимного проворота деталей. Пример такого механизма представлен на рис. 8. Достоинства такого механизма – отсутствие необходимости применения охлаждающих жидкостей и дополнительных узлов управления. Но механизм имеет и недостатки, связанные с образованием шума и вибраций в момент фиксации, а также ограничения применения в передачах с большими скоростями, так как зацепление в таком механизме происходит в режиме ударного нагружения. Величина передаваемого момента M в таком механизме

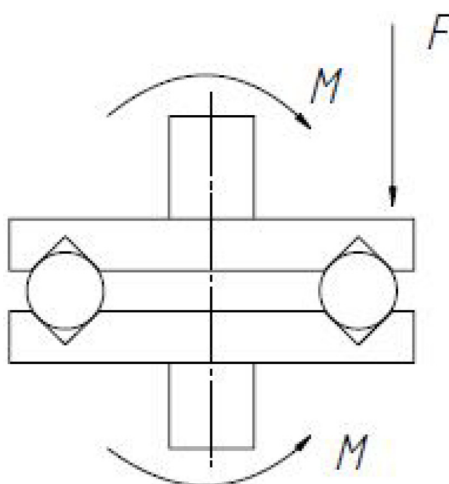


Рис. 8. Муфта с телами качения

Fig. 8. Coupling with rolling elements

определяется прижимающей силой F и углами в конусах, в которых фиксируются тела качения, а также радиусом на котором они расположены. При этом сила F не должна превышать несущей способности тел качения.

Конструктивная реализация предлагаемого варианта организации механизма изменения передаточного числа редуктора

Механизм изменения передаточного числа предлагается организовать из трех основных частей: электромагнита, якоря и шунта. При этом для обеспечения устойчивого удержания каждого из заданных положений, даже при отсутствии электропитания в составе устройства, присутствует мощный постоянный магнит. Он располагается не в составе электромагнита (как это предполагает традиционная конструкция), а в составе якоря, что позволяет якорю примагничиваться и к электромагниту, и шунту, сохраняя при этом устойчивое положение. Изменение положения якоря осуществляется подачей напряжения на катушку электромагнита, при этом в катушке возникает ток и индуцируется магнитное поле, силовые линии которого направлены в зависимости от направления течения тока в катушке. Таким образом, магнитное поле, создаваемое катушкой, взаимодействует с магнитным полем от постоянного магнита, и в зависимости от взаимного направления силовых линий, создаваемых постоянным магнитом и катушкой, постоянный магнит или притягивается к электромагниту, или отталкивается. Так как шунт не может индуцировать магнитное поле, то при сонаправленных силовых линиях магнитного поля электромагнит может оторвать якорь от шунта и замкнуть магнитное поле внутри собственного контура, когда нужно оторвать якорь от электромагнита, то меняется направление питающего напряжения, и за счет силы отталкивания якорь перемещается к шунту и примагничивается к нему. Предлагаемый вариант механизма представлен на рис. 9.

Когда якорь зафиксирован на электромагните, то планетарная передача работает как редуктор, эпицикл, зафиксированный на якоря, является опорным (неподвижным) звеном, солнечная шестерня входным звеном, а водило выходным звеном, с которого снимается редуцированная скорость и увеличенный момент, определяемые передаточным числом передачи. Когда якорь зафиксирован на шунте эпицикл жестко связывается с водилом, при этом сателлиты оказываются заблокированы и редукции скорости не происходит, водило при этом начинает вращаться с такой же скоростью, как солнечная шестерня, таким образом, передаточное отношение передачи становится равно единице.

Рассмотрим подробнее составные части предлагаемого технического решения.

Электромагнит имеет в своем составе катушку и кольцевой магнитопровод, возможен вариант с добавлением в электромагнит постоянного магнита, тогда у механизма переключения передач будет только одно пассивное положение, а для удержания во втором положении надо будет постоянно подавать ток в катушку. Существуют электромагниты нормально замкнутые, когда при отсутствии электропитания магнитные силы притягивают якорь, и нормально разомкнутые, когда при отсутствии питания магнитные силы притяжение не осуществляют. В предлагаемом варианте реализован принцип с нормально замкнутым магнитным контуром, при этом сам электромагнит используется нормально разомкнутый.

Якорь реализован в виде постоянного магнита, заключенного в магнитопроводящие кольца по внешнему и внутреннему диаметрам. Так как для изменения передаточного числа необхо-

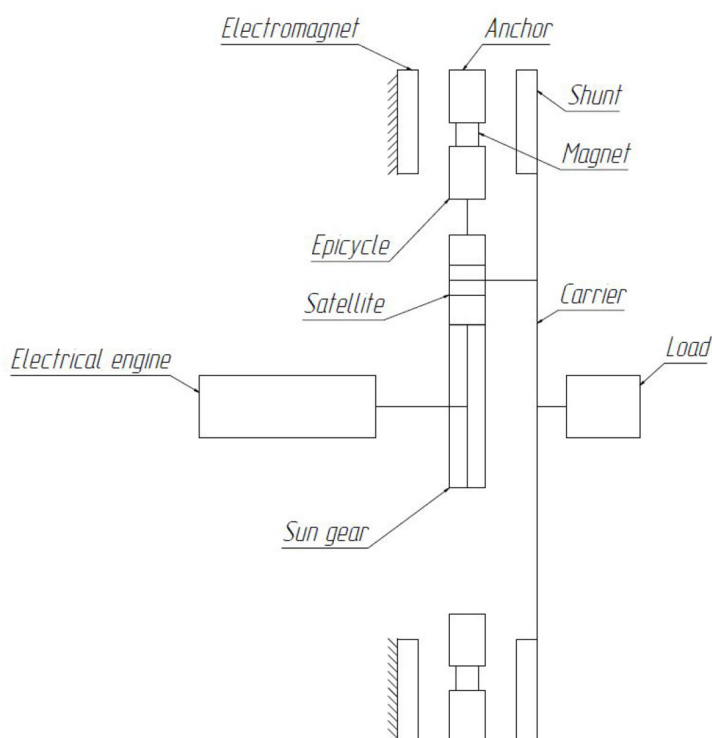


Рис. 9. Схема механизма переключения передач

Fig. 9. Diagram of the gearshift mechanism

можно осуществлять фиксацию эпицикла в двух положениях, то в состав якоря также входит и эпицикл планетарной передачи, который таким образом перемещается и фиксируется вместе с якорем либо на электромагните, либо на шунте, связанном с водилом. В качестве магнита предлагается применить кольцевой неодимовый магнит, имеющий радиальную намагниченность. Основные типы намагниченности постоянных магнитов представлены на рис. 10. Неодимовый магнит обладает крайне высоким коэффициентом остаточной магнитной индукции, коэрцитивной силой и плотностью магнитной энергии по сравнению с ферритовыми магнитами.

Шунт является магнитопроводящим контуром и выполняет роль участка магнитопровода при фиксации на нем якоря. Конструктивно он может быть выполнен в виде одной детали, которая жестко связана с водилом в планетарной передаче.

Достоинствами такого механизма будут его малые габариты, простота конструкции, долговечность и надежность. Но также присутствуют и недостатки, такие как необходимость операций по настройке рабочих зазоров при сборке агрегата и образующийся в процессе переключения передачи шум и вибрации из-за передачи момента при фиксации шариков в конусных углублениях, а также ограничение применения в передачах с большими скоростями, так как зацепление в таком механизме происходит в режиме ударного нагружения. Потенциально недостатки такого механизма можно несколько уменьшить за счет более высокой точности изготовления деталей и составных частей, это позволит уменьшить зазоры и применить шарики как можно более меньших размеров, это позволит уменьшить шум и вибрации при

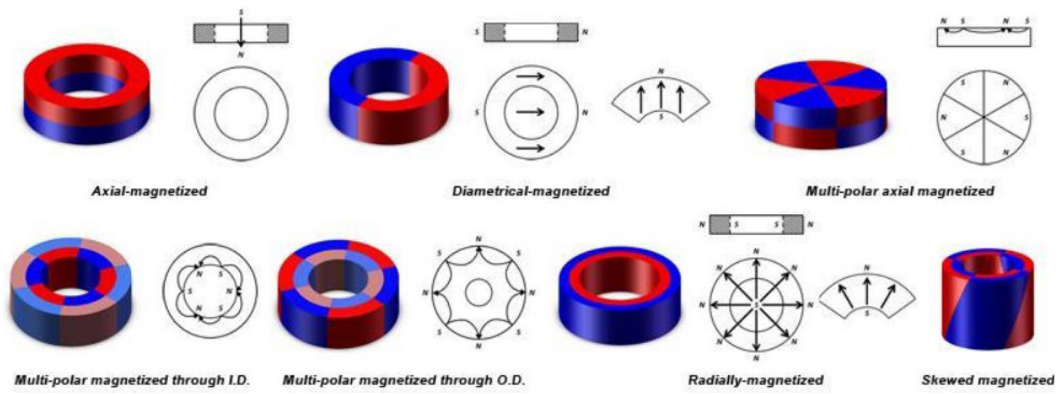


Рис. 10. Типы намагниченности постоянных магнитов [19]

Fig. 10. Types of magnetization of permanent magnets [19]

переключения. Для увеличения ресурса шариковых муфт желательно осуществлять изменение передаточного числа при небольших угловых скоростях, так как это существенно снизит нагрузки, связанные с ударным нагружением тел качения, через которые осуществляется передача момента и фиксация эпицикла. Проектный облик механизма, изменяющего передаточное число, представлен на рис. 11. Солнечная шестерня, сателлиты, водило, двигатель и нагрузка на рис. 11 не показаны и могут иметь различный конструктив в зависимости от требований при встраивании в изделия.

Разработанный авторами проект механизма изменения передаточного числа обладает характеристиками, представленными в табл. 1. Из табл. 1 можно отметить, что в зависимости

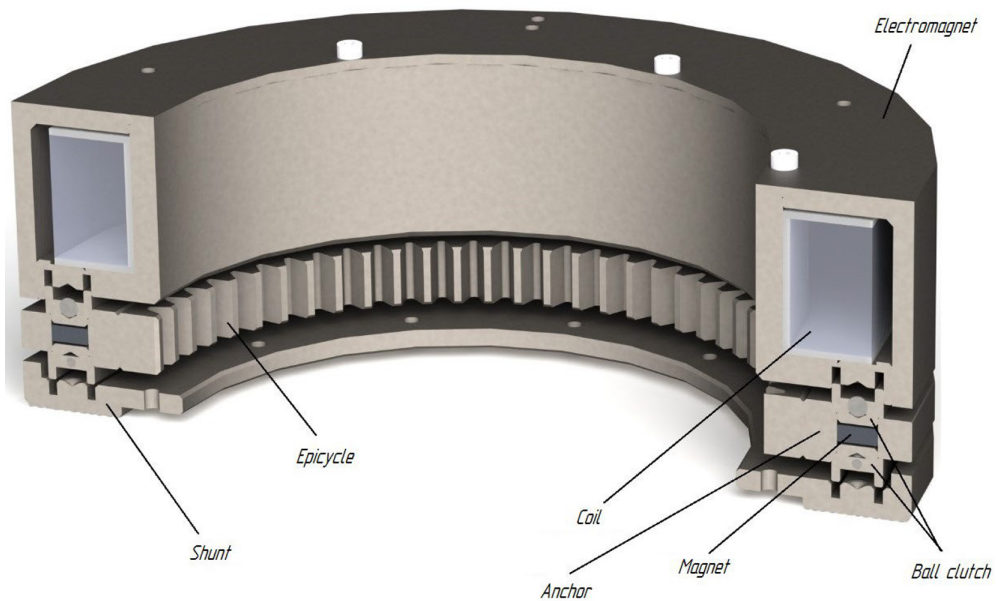


Рис. 11. Пример механизма, изменяющего передаточное число

Fig. 11. An example of a mechanism for changing the gear ratio

Табл. 1. Характеристики механизма

Table 1. Movement characteristics

Фиксация	Потребляемая мощность при удержании механизма в заданном положении, Вт	Потребляемая мощность в момент переключения, Вт	Передаваемый момент, Нм
Якорь – электромагнит	0	37	16,2
Якорь – шунт	0	37	3,3

от положения якоря меняется момент, передаваемый через передачу. Это сделано сознательно, так как момент определяется силой прижима якоря к поверхности, уменьшение силы прижима к шунту позволяет сократить затраты электроэнергии на переключение передачи, так как электромагниту нужно преодолеть меньшее усилие для отрыва якоря от шунта. Технически это реализуется через изменение геометрии магнитного контура шунта, уменьшая его сечение по сравнению с магнитным контуром электромагнита. С другой стороны, при фиксации якоря на электромагните момент, который воспринимает якорь, равен произведению момента двигателя и передаточного числа планетарной передачи, а при фиксации якоря на водиле редукции не происходит и момент двигателя не увеличивается, таким образом, различие в передаваемых моментах в зависимости от положения якоря на эксплуатационных характеристиках никак не сказывается.

При добавлении в состав механизма изменения передаточного числа солнечной шестерни сателлитов и водила он образует одноступенчатый планетарный редуктор. Передаточное отношение i редуктора может приобретать два значения: единицу и вычисляемое по формуле (1), где z_2 и z_1 количество зубьев эпицикла и солнечной шестерни соответственно.

$$i = \frac{z_1}{z_2} + 1, \quad (1)$$

Как было описано выше, это происходит в зависимости от фиксации эпицикла на подвижном водиле или на неподвижном электромагните. Для нормальной работы движителя МР, в общем случае, величина передаточного числа должна быть увеличена, например, путем добавления дополнительных ступеней планетарного редуктора. Как правило, это необходимо для приведения моментно-скоростных характеристик электродвигателя к характеристикам, требуемым от МР. При этом общее передаточное число определяется перемножением передаточных чисел установленных в движителе редукторов или их ступеней

Выводы

В ходе написания статьи были рассмотрены различные варианты организации шасси МР, а также возможные способы изменения передаточного числа. Был рассмотрен вариант организации механизма, изменяющего передаточное число редуктора, а также представлены характеристики проектного механизма.

Список литературы / References

[1] Васильев А. В. *Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов*. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. 124–131. [A. V. Vasiliev *Principles of construction and classification of the chassis of mobile robots for ground use and planetary rovers*. Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Informatics. Telecommunications. Control. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2013. 124–31 (in Rus.)]

[2] Наземные РТК Капитан Малогабаритный робототехнический комплекс (МРК) // ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики URL: <https://rtc.ru/solution/kapitan/> (дата обращения: 10.10.2022). [Ground-based RTK Kapitan Small-sized robotic complex (MRK) // State Scientific Center of the Russian Federation Central Research Institute of Robotics and Technical Cybernetics URL: <https://rtc.ru/solution/kapitan/> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[3] Средства радиационного мониторинга РТК-10 Робототехнический комплекс радиационной разведки // ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики URL: <https://rtc.ru/solution/rtk-10/> (дата обращения: 10.10.2022). [Radiation monitoring equipment RTK-10 Robotic complex for radiation reconnaissance // State Research Center of the Russian Federation Central Research Institute of Robotics and Technical Cybernetics URL: <https://rtc.ru/solution/rtk-10/> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[4] APC – Шагающий поисково-спасательный робот // DevsDay.ru URL: <https://devsday.ru/news/details/343395> (дата обращения: 10.10.2022). [ARS – Walking Search and Rescue Robot // DevsDay.ru URL: <https://devsday.ru/news/details/343395> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[5] Космачёв П. В. Анализ конструктивных схем движителей транспортных средств робототехнических комплексов для выполнения антитеррористических операций. *Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды IX Всеросс. науч.-практ. конф. СПб., НПО Специальных материалов*, 2006. 5: Экстремальная робототехника. 607–615. [Kosmachev P. V. Analysis of constructive schemes of vehicle propulsion devices of robotic complexes for performing anti-terrorist operations. *Actual problems of protection and safety: works of the IX All-Russian. scientific-practical. conf. SPb., NPO Special Materials*, 2006. 5: Extreme Robotics. 607–615 (in Rus.)]

[6] Батанов А. Ф., Грицынин С. П., Муркин С. В. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций. *Специальная техника*. 1999. 6. 10–17. [Batanov A. F., Gritsynin S. P., Murkin S. V. Robotic complexes for ensuring special operations. *Special Technique*. 1999. 6. 10–17 (in Rus.)]

[7] Васильев А. В. Исследование и классификация структурно-кинематических схем шасси мобильных роботов. *Перспективные системы и задачи управления: материалы IX Всеросс. науч. практ. конф.* Таганрог, Изд-во ЮФУ, 2014 115–128. [Vasiliev A. V. Research and classification of structural-kinematic schemes of the chassis of mobile robots // *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: materials IX Vseross. scientific practical conf.* Taganrog, Publishing House of Southern Federal University, 2014, 115–128 (in Rus.)]

[8] Transcend Robotics Introduces ARTI3 Product Line for Mobile Ground Robotics // NEWSWIRE URL: <https://www.newswire.com/news/transcend-robotics-introduces-arti3-product-line-for-mobile->

ground-9468670 (дата обращения: 10.10.2022). [Transcend Robotics Introduces ARTI3 Product Line for Mobile Ground Robotics // NEWSWIRE URL: <https://www.newswire.com/news/transcend-robotics-introduces-arti3-product-line-for-mobile-ground-9468670> (date of access: 10.10.2022)]

[9] ЭкзоМарс. Википедия URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ЭкзоМарс> (дата обращения: 10.10.2022). [ExoMars. Wikipedia URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ExoMars> (Accessed: 10.10.2022) (in Rus.)]

[10] Пат. 174854 Российская Федерация, МПК H02P 6/16, H02K 29/06. Безредукторный электромеханический привод, Кузнецов Владимир Анатольевич, Трутс Александр Александрович, Чижевский Роман Александрович; *заявитель и патентообладатель* Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК) – № 2016150065; заявл. 2016.12.19; опубл. 2017.11.08–7 с [Pat. 174854 Russian Federation, IPC H02P 6/16, H02K 29/06. Gearless electromechanical drive / Kuznetsov Vladimir Anatolyevich, Truts Alexander Alexandrovich, Chizhevsky Roman Alexandrovich; applicant and patent holder Federal State Autonomous Scientific Institution “Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics” – No. 2016150065; dec. 2016.12.19; publ. 2017.11.08–7 p.]

[11] Колесно-шагающий транспортный модуль высокой проходимости «Торнадо» // МГТУ им. Н. Э. Баумана URL: <http://niism.bmstu.ru/otdelyi-nii-sm/sm4-6/tm-tornado> (дата обращения: 10.10.2022). [Wheeled-walking transport module of the high-speed bridge “Tornado” // MSTU named after N.E. Bauman URL: <http://niism.bmstu.ru/otdelyi-nii-sm/sm4-6/tm-tornado> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[12] Автоматическая коробка передач. Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Автоматическая_коробка_передач (дата обращения: 10.10.2022). [Automatic transmission. Wikipedia URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Automatic_transmission_ (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[13] Автоматическая трансмиссия. GREEN WAY URL: <https://green-way.com.ua/ru/dovidniki/pidruchnyk-po-vlashtuvannju-avtomobilja-single/rozdil23-avtomatychna-transmisija/punkt-variator-pryncyp-roboty> (дата обращения: 10.10.2022). [Automatic transmission. GREEN WAY URL: <https://green-way.com.ua/ru/dovidniki/pidruchnyk-po-vlashtuvannju-avtomobilja-single/rozdil23-avtomatychna-transmisija/punkt-variator-pryncyp-roboty> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[14] Бесступенчатая трансмиссия. Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Бесступенчатая_трансмиссия (дата обращения: 10.10.2022). [Stepless transmission. Wikipedia URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Stepless_transmission (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[15] Дифференциал в автомобиле это: что это, значение, принцип работы. DVD-AUTO.RU URL: <https://dvd-auto.ru/avtomobil-2/differenczial-v-avtomobile-eto-chto-eto-znachenie-princzip-raboty.html> (дата обращения: 10.10.2022). [The differential in a car is: what is it, meaning, principle of operation. DVD-AUTO.RU URL: <https://dvd-auto.ru/avtomobil-2/differenczial-v-avtomobile-eto-chto-eto-znachenie-princzip-worky.html> (accessed 10/10/2022) (in Rus.)]

[16] Все о редукторах. Регион привод URL: <http://kursk.region-privod.ru/> (дата обращения: 10.10.2022). [All about gearboxes. Region drive URL: <http://kursk.region-privod.ru/> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[17] И все-таки замена стартера. Drive2.ru URL: <https://www.drive2.ru/l/542345106590532223/?m=543213171020661613> (дата обращения: 10.10.2022). [And yet, replacing the starter. Drive2.

ru URL: <https://www.drive2.ru/l/542345106590532223/?m=543213171020661613> (date of access: 10/10/2022) (in Rus.)]

[18] Обгонная муфта акпп принцип работы. Авто Сервис URL: <https://lakkroll.ru/obgonnaya-mufta-akpp-printsip-raboty/> (дата обращения: 10.10.2022). [Overrunning clutch automatic transmission principle of operation. Auto Service URL: <https://lakkroll.ru/obgonnaya-mufta-akpp-printsip-raboty/> (date of access: 10.10.2022) (in Rus.)]

[19] N 45SH Magnets // SDM Magnetism URL: <http://www.magnetschina.com/magnets/neodymium-magnets/n45sh-magnets.html> (дата обращения: 10.10.2022). [N 45SH Magnets // SDM Magnetism URL: <http://www.magnetschina.com/magnets/neodymium-magnets/n45sh-magnets.html> (accessed 10/10/2022) (in Rus.)]