УДК 621.318.23

Исследование влияния длины промежуточного магнитопровода на характеристики магнитного захвата для робототехнических комплексов горнодобывающей промышленности

К.Д.КРЕСТОВНИКОВ, Е.О.ЧЕРСКИХ , А.И.САВЕЛЬЕВ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Проведен анализ существующих систем механических захватов различных принципов работы и сред эксплуатации, в конструкции которых используются как магнитомягкие, так и магнитотвердые материалы. Показаны характеристики существующих прототипов и приведены результаты собственных исследований.

В статье представлено исследование влияния длины промежуточного магнитопровода на характеристики магнитного захвата, принцип действия которого основан на управлении полем постоянного магнита. Основанный на данном принципе действия захват не требует постоянных расходов энергии на поддержание как включенного, так и выключенного состояний.

Приведено описание конструкции магнитного захвата и конструкции испытательного стенда, а также результаты серии экспериментов по определению силы расцепления захвата при различных длинах магнитопровода во включенном и выключенном состояниях с последующей статистической обработкой данных. Выявлены интервалы диапазонов, в которых с наибольшей вероятностью будет находиться значение силы расцепления захвата для различных длин промежуточного магнитопровода. Определен характер распределения случайной величины, которой является сила расцепления захвата. Построены зависимости силы расцепления захвата от длины промежуточного магнитопровода для каждого из состояний захвата. Установлено, что уменьшение длины промежуточного магнитопровода, является причиной снижения силы сцепления захвата. Построены графики зависимости силы расцепления захвата с использованием мод рядов значений силы для наглядного отображения результатов экспериментов. Максимальная сила сцепления магнитного захвата – 9,5 кг – достигнута при длине промежуточного магнитопровода 50 мм, минимальная при длине 25 мм – 5,6 кг.

Ключевые слова: магнитный захват; управление полем постоянного магнита

Как цитировать эту статью: Крестовников К.Д. Исследование влияния длины промежуточного магнитопровода на характеристики магнитного захвата для робототехнических комплексов горнодобывающей промышленности / К.Д.Крестовников, Е.О.Черских, А.И.Савельев // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 46-52. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.46

Введение. Современные тенденции развития горной промышленности направлены на автоматизацию производства внедрением различных робототехнических комплексов [1], [2]. Одним из важных направлений исследований в области робототехники является разработка новых технических решений в направлении систем захватов для взаимодействий между роботами, их частями и средой их эксплуатации.

Наиболее часто встречающимся техническим решением являются механические захваты. Механический захват требует наличия приводного устройства и исполнительной механической подсистемы, что требует двойного преобразования энергии вследствие того, что, как правило, источником энергии робота служит аккумуляторная батарея. Решением, исключающим механическую подсистему и не требующим двойного преобразования энергии, является использование магнитных захватов. Эту категорию захватов можно разделить на электромагнитные и основанные на постоянном магните. Электромагнитные захваты требуют постоянного расхода энергии на поддержание включенного состояния, что является значительным недостатком при их использовании в составе автономных систем. Данного недостатка лишены захваты, основанные на постоянных магнитах [7], в то же время они требуют дополнительных механических систем расцепления. Перспективным направлением исследований является применение магнитных захватов, основанных на принципе управления полем постоянного магнита. Такие системы не требуют постоянных расходов энергии на поддержание включенного состояния и дополнительных систем расцепления захвата.

В работах [4], [16] предлагается конструкция термомагнитного захвата, в котором применяется локальный электрический нагрев и охлаждение. Захват состоит из магнитомягкого материала, выполненного из гадолиния (Gd), термоэлектрического генератора (ТЭГ), постоянного магнита (NdFeB) и двух упругих элементов, на которых находится сам захват, с одним жестко зафиксиро-

рованным концом (CuBe). Температура ниже точки Кюри изменяет свойства гадолиния с парамагнитных на ферромагнитные. Создается сила магнитного притяжения между NdFeB и Gd, которая впоследствии соединяет упругие элементы друг с другом. После этого к термоэлектрическому генератору применяется обратно направленный постоянный ток для нагрева гадолиния. При повышении температуры выше точки Кюри гадолиний меняет свои магнитные свойства с ферромагнитных на парамагнитные. Таким образом, сила магнитного притяжения устраняется, и упругие элементы захвата возвращаются в исходное положение.

Роботизированный захват, состоящий из электромагнита и эластичной мембраны, заполненной жидкостью, называемой MRα, представлен в [11]. Жидкость MRα представляет собой ферромагнитную жидкость с добавлением немагнитного материала для улучшения ее затвердевания. При активном магнитном поле частицы железа выравниваются вдоль линий магнитного потока и образуют структуру столбца, а немагнитные частицы попадают в щель между столбцами железа. В качестве эластичной мембраны, в которую помещена жидкость, использован силиконовый каучук. Максимальная сила захвата составляет 50,67 Н.

В статьях [8], [17] рассматривается применение эффекта пластической деформации эластомеров при использовании в магнитном захвате. Такие захваты могут приспосабливать свою форму к геометрии объектов и легко захватывать их. Первоначальная форма захвата может быть восстановлена при отключении магнитного поля. Индуцированный полем эффект пластичности магниточувствительных эластомеров используется для реализации обратимой, восстанавливаемой и адаптируемой к различным формам объектов формы захвата.

В работе [10] представлен миниатюрный челюстнообразный магнитный захват для манипулирования небольшими объектами с применением материалов из магнитореологических эластомеров на основе матрицы из силиконового каучука, изготавливаемых без применения магнитного поля. При проведении экспериментов использовалась управляющая катушка с плотностью тока равной 4,58 А/мм². Образцы были изготовлены из двухкомпонентного силиконового каучука с 50 %-ным содержанием частиц карбонильного железа размером 10 мкм. Разработанные образцы помещались в магнитное поле, которое варьировалось от 0 до 100 кА/м. Наблюдения за образцами в присутствии и в отсутствие магнитного поля показывают, что магнитное поле увеличивает жесткость материала. Более высокое нормальное напряжение, полученное от 30 % MRE, которое составляет около 5,74 Н/мм², а средняя скорость стресса принадлежит образцу из 50 %. При испытаниях захвата использовалась активирующая катушка с плотностью тока 4,58 А/мм². Минимальное магнитное поле, требуемое для захвата, составляет 1,25 кА/м.

Дистанционно управляемый двойной магнито- и фотореактивный мягкий захват представлен в источнике [3]. Неуправляемый мягкий привод состоит из магниточувствительного полидиметилсилоксанового слоя, содержащего порошок магнитного железа, нанесенный на центральную область светочувствительной жидкокристаллической полимерной пленки, содержащей фотохромные азобензольные красители. Свет используется для запуска привода.

Модульные реконфигурируемые роботы с пневматическим приводом, состоящие из мягких и твердых компонентов и материалов представлены в работе [9]. Мягкие компоненты данных роботов представляют собой исполнительные механизмы, изготовленные из силиконовых эластомеров, твердые компоненты – структуры, выполненные из ABS-пластика, изготовленные с использованием 3D-печати. Кольцевые магниты (NdFeB) расположены внутри мягких частей для создания и поддержания связей между ножками захвата. Обратимость этих магнитных соединений позволяет быстро реконфигурировать этих роботов. Сочетание магнитов с пневматическим управлением позволяет легко изменять конструкцию модульных роботов в соответствии с требованиями различных задач.

В статье [7] рассматривается конструкция магнитного захвата, при помощи которого беспилотные летательные аппараты могут перемещать железные объекты. В этой конструкции для захвата используются постоянные магниты, для расцепления – механизм двойного импульсного разъединения. Конструкция захвата состоит из нескольких частей, выполненных из жесткого пластика VeroGrey/Black или гибкого пластика Tango-Black. На основании захвата расположены четыре магнитные площадки, каждая из которых содержит по четыре магнита, распределенные таким образом, что каждый из магнитов имеет одинаковый полюс. Между магнитами имеется изолированное пластиковое разделение. Каждый из магнитов способен обеспечивать подъем око-

ло 1 кг. Механизм расцепления включает в себя два сервопривода, которые при активации сбрасывают полезную нагрузку. Конструкция захвата позволяет перевозить до четырех железных предметов.

В статье [14] представлены виды захватов, используемые в известных и неизвестных средах, медицине, микро- и нанозахваты, пьезоэлектрические захваты и адаптируемые захваты из мягких материалов. Характеристики захватов, такие как размер, вес, жесткость и простота, рассматриваются для различных конструкций роботизированных захватов.

Конструкция магнитных захватов для двуногого робота HyReCRo (Hybrid Redundant Climbing Robot) представлена в статье [6]. Магнитный захват оборудован тремя переключаемыми магнитами NdFeB диаметром 20 мм и высотой 5 мм, располагающимися между двумя пластинами из полилактида (PLA). Магниты расположены по окружности под углом 120° друг к другу. Нижняя пластина жестко соединена с магнитами, на верхней пластине расположены три двигателя, приводящие в действие механизм, переключающий состояние магнита. Сила сцепления каждого магнита составляет 11 кг.

Данные исследования иллюстрируют различные конструкции магнитных захватов. Применение в динамических и постоянных средах и необходимость захвата объектов разных размеров и форм объясняют потребность во множестве конструкций захватов.

В исследованиях авторов [5], [12] представлен прототип магнитного захвата, основанный на принципе управления магнитным полем постоянного магнита. Разработанный экспериментальный образец обладал следующими характеристиками: средняя сила расцепления захвата – 3,7 кг, напряжение управляющего импульса – 6 В, сила тока – 0,17 А. Далее был разработан магнитный захват цилиндрической формы, аналогичный по принципу работы экспериментальному образцу. При тестировании данного образца магнитного захвата получены рабочие характеристики, значительно отличающиеся от характеристик экспериментального образца. Основным отличием образцов явилась меньшая длина промежуточного магнитопровода. Далее будут представлены результаты экспериментов по измерению силы сцепления и расцепления магнитного захвата при различной длине промежуточного магнитопровода и рассмотрена конструкция и принцип работы магнитного захвата.

Описание конструкции магнитного захвата. Разработанный магнитный захват (рис.1, а) состоит из активной и пассивной частей. Активная часть состоит из магнитопровода управляющего электромагнита 1, управляющего электромагнита 2, постоянного магнита (NdFeB) 4 и промежуточного магнитопровода 3, 5. Пассивная часть магнитного захвата включает в себя магнитопровод пассивной части 7. Захват имеет плоскости сопряжения между активной и пассивной частью 6. Для исследования и построения явных зависимостей использовался промежуточный магнитопровод следующих длин: 25 мм, в два раза большей длины – 50 мм, и промежуточного значения – 35 мм. На рис.1 также представлены два состояния захвата – включенное (1, б) и выключенное (1, в) и показано направление линий магнитной индукции.

Рис.1. Конструкция магнитного захвата (а), включенное состояние (б), выключенное состояние (в)

В выключенном состоянии линии магнитного поля проходят по промежуточному магнитопроводу и магнитопроводу управляющего магнита. Во включенном состоянии магнитный поток замыкается через магнитопровод пассивной части захвата. Переключение состояний осуществляется подачей управляющего импульса на обмотку электромагнита. В зависимости от направления тока управляющего импульса поток, создаваемый электромагнитом, может быть сонаправлен потоку постоянного магнита, что соответствует переключению захвата в выключенное состояние, и направлен противоположно, что соответствует переключению захвата во включенное состояние.

Описание конструкции испытательного стенда. Экспериментальная часть исследования проводилась на динамометрическом стенде (рис.2). На основании стенда 2, при помощи двух опор 1, 9 закреплены два направляющих вала 5. На валах располагается подвижная каретка 8, приводимая в движение передачей гайка-винт 11, 12. Между опорой и гайкой передачи гайка-винт для облегчения вращения гайки расположена шайба 10. Каретка требуется для крепления на ней измерительного прибора (динамометра) 7, соединенного с помощью демпфирующего элемента 6, который необходим для сглаживания колебаний усилия расцепления, приложенного к захвату. Магнитный захват закреплен на опоре через адаптирующий крепежный элемент 3 с возможностью использования промежуточного магнитопровода различной длины.

Демпфирующий элемент соединен с магнитопроводом пассивной части через нежестко закрепленный на магнитопроводе пластиковый переходный элемент 4, что исключает силы, приложенные перпендикулярно плоскости сопряжения захвата.

Проведена серия экспериментов для определения силы сцепления и расцепления магнитного захвата.

Эксперимент 1. Измерение силы расцепления во включенном состоянии захвата. Опыты проводились с одинаковой энергией управляющего импульса равной 5 Дж. Всего было проведено три опыта по измерению силы расцепления захвата, в каждом из которых использовалась разная длина магнитопровода. В каждом опыте выполнено 150 измерений силы расцепления захвата во включенном состоянии. Зависимости силы расцепления F от разных значений длины магнитопровода n представлены на рис.3.

Рис.2. Конструкция испытательного стенда

Рис.3. Результаты измерения силы расцепления во включенном состоянии захвата с длиной магнитопровода: 50 мм (а), 35 мм (б), 25 мм (в)

Рис.4. Гистограммы результатов эксперимента во включенном состоянии захвата с длиной магнитопровода: 50 мм (а), 35 мм (б), 25 мм (в) p – вероятность попадания силы расцепления в интервал; F – сила, приложенная для расцепления захвата

Верхняя и нижняя граница на графиках показывают область, в которой могут находиться значения случайной величины с вероятностью 0,9973 [13]. Наибольшее значение силы расцепления – 9,5 кг – было зафиксировано при длине магнитопровода 50 мм. Наименьшее значение силы расцепления – 5,6 кг – было отмечено при длине магнитопровода, равной 25 мм. Два значения, не входящие в интервал 3σ , были отброшены в опыте с длиной магнитопровода 25 мм. Появление таких значений может быть связано с возможными неточностями при проведении эксперимента, вызванными появлением частиц различного рода между плоскостями сопряжения активной и пассивной частей захвата.

Построен интервальный вариационный ряд для определения наиболее характерных значений выборки и разброса данных. Для построения интервального ряда было выбрано восемь интервалов k (рис.4). Данное количество было вычислено как оптимальное в соответствии с формулой Стерджесса [15]

$$k = 1 + \lg(N),$$

где N – объем выборки.

Из представленных гистограмм можно сделать вывод о том, в каком интервале с наибольшей вероятностью будет находиться значение силы расцепления захвата во включенном состоянии. Интервалы наиболее вероятной силы расцепления захвата:

Длина магнитопровода, мм	50	35	25
Интервал силы расцепления захвата, кг	[8,6; 8,95)	[7,9; 8,2)	[6,2; 6,55)

Для всех длин промежуточного магнитопровода гистограммы являются унимодальными и близки к симметричной форме. Исходя из формы аппроксимационной кривой, наиболее вероятно, что случайная величина имеет нормальный закон распределения.

Эксперимент 2. Измерение силы расцепления в выключенном состоянии захвата. Эксперимент проводился с энергией управляющего импульса 5 Дж, как и опыты по расцеплению захвата во включенном состоянии. Для каждой длины магнитопровода в опытах выполнено 50 измерений силы расцепления захвата (рис.5). Длины магнитопровода идентичны длинам магнитопровода первого эксперимента. Для построения гистограмм значения выборки были разбиты на шесть интервалов согласно приведенной формуле.

Максимальное значение силы расцепления захвата в выключенном состоянии составило 1,3 кг при длине магнитопровода, равной 50 мм. Минимальная сила расцепления для всех проведенных опытов составила 0,31 кг при длине магнитопровода, равной 25 мм. В эксперименте 2 значения, выходящие за интервал 3σ , присутствуют в опытах с длинами магнитопровода 35 мм и 25 мм. Данные значения были отброшены при построении представленных на рис.6 гистограмм.

Из гистограмм следует, что значение силы расцепления с наибольшей вероятностью попадет в интервал [1,1; 1,25) при длине магнитопровода 50 мм, [0,94; 1,09) – при длине магнитопровода 35 мм и [0,45; 0,55) при длине магнитопровода 25 мм.

Средняя сила расцепления захвата во включенном состоянии:

Длина магнитопровода, мм	50	35	25
Средняя сила расцепления захвата, кг	8,41	7,95	6,61

Рис.5. Результаты измерения силы расщепления в выключенном состоянии захвата с длиной магнитопровода: 50 мм (а), 35 мм (б), 25 мм (в)

Рис.6. Гистограммы результатов опыта в выключенном состоянии захвата с длиной магнитопровода 50 мм (а), 35 мм (б), 25 мм (в)
 p – вероятность попадания силы расщепления в интервал;
 F – сила, приложенная для расщепления захвата

Исходя из значений, можно сделать заключение, что уменьшение длины промежуточного магнитопровода снижает значение силы расщепления захвата.

Средняя сила расщепления захвата в выключенном состоянии:

Длина магнитопровода, мм	50	35	25
Средняя сила расщепления захвата, кг	1,02	0,88	0,46

В выключенном состоянии просматривается аналогичная зависимость – снижения силы расщепления при уменьшении длины промежуточного магнитопровода. Средняя сила расщепления при длине промежуточного магнитопровода – 50 мм, что приблизительно в два раза больше, чем при длине 25 мм.

На рис.7 представлены графики, построенные по модам рядов значений силы расщепления захвата во включенном и выключенном состояниях, так как именно этот параметр отражает наиболее частые значения силы расщепления захвата.

Закключение. В работе проведено исследование влияния длины промежуточного магнитопровода на силу расщепления захвата во включенном и выключенном состояниях. При изменении длины промежуточного магнитопровода в два раза (с 50 мм до 25 мм) среднее значение силы

Рис.7. Графики зависимости силы расщепления захвата от длины промежуточного магнитопровода в выключенном (а) и включенном (б) состояниях

расщепления во включенном состоянии уменьшается на 21 %, а в выключенном – на 55 %. При длине промежуточного магнитопровода 50 мм значение силы расщепления во включенном состоянии будет заключено в интервале [6,85; 9,65], для магнитопровода длиной 35 мм – [6,7; 9,1], при

длине 25 мм – [5,5; 9,65]. Построенные в данной работе гистограммы дают представление о наиболее вероятной величине силы расщепления захвата для различной длины магнитопровода и режимов работы. Дальнейшие исследования будут проводиться в направлении моделирования магнитных полей в виртуальной среде и разработки методики расчета параметров представленного магнитного захвата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возможность автоматизации процесса сортировки губчатого титана / В.А.Лихтерман, Р.Е.Ширяев, Р.А.Сандлер, Е.Ф.Цыпин, К.С.Асанович, В.З.Козин // Записки Горного института. 1978. Т. 78. С. 111-113.
2. Макаров В.В. Динамическая стабилизация процесса резания на основе локальной метастабильности в управляемых робототехнических комплексах на станках с ЧПУ / В.В.Макаров, Ю.Ольт // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 446-451. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.446
3. An Untethered Magnetic- and Light-Responsive Rotary Gripper: Shedding Light on Photoresponsive Liquid Crystal Actuators / M.P.Cunha, Y.Foelen, R.J.H. van Raak and others // Advanced Optical Materials. 2019. Vol. 7. DOI: 10.1002/adom.201801643
4. Chen C. A novel thermomagnetic gripper / C.Chen, T.Chung // IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG). 11-15 May 2015. Beijing, China. 2015. DOI: 10.1109/INTMAG.2015.7157658
5. Design and Operation Principles of the Magnetomechanical Connector of the Module of the Mobile Autonomous Reconfigurable System / N.A.Pavliuk, K.D.Krestovnikov, D.E.Pykhov, V.U.Budkov // Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference. Leipzig, Germany, 2018. Proceedings. P. 202-212. DOI: 10.1007/978-3-319-99582-3_21
6. Design of compact switchable magnetic grippers for the HyReCRO structure-climbing robot / A.Peidro, M.Tavakoli, J.M.Marin, O.Reinoso // Mechatronics. 2019. Vol. 59. P. 199-212.
7. Fiaz U.A. An Intelligent Gripper Design for Autonomous Aerial Transport with Passive Magnetic Grasping and Dual-Impulsive Release / U.A.Fiaz, M.Abdelkader, J.S.Shamma // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 9-12 July 2018. Auckland, New Zealand. 2018. P. 1027-1032. DOI: 10.1109/AJM.2018.8452383
8. Field-induced plasticity of magneto-sensitive elastomers in context with soft robotic gripper applications / J.Chavez Vega, T.Kaufhold, V.Böhm and others // PAMM. 2017. Vol. 17. № 1. P. 23-26. DOI: 10.1002/pamm.201710007
9. Magnetic assembly of soft robots with hard components / S.W.Kwok, S.A.Morin, B.Mosadegh and others // Advanced Functional Materials. 2014. Vol. 24. № 15. P. 2180-2187. DOI: 10.1002/adfm.201303047
10. MREs development and its application on miniature gripper / A.Naimzad, M.Ghodsi, Y.Hojjat, A.Maddah // Proceeding of International Conference on Advanced Materials Engineering. 2011. Vol. 15. P. 75-80.
11. Okatani Y. Development of universal robot gripper using MR fluid / Y.Okatani, T.Nishida, K.Tadakuma // Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS). 3-6 December 2014. Kitakyushu, Japan. 2014. P. 231-235. DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044707
12. Pavliuk N.A. Mobile Autonomous Reconfigurable System / N.A.Pavliuk, K.D.Krestovnikov, D.E.Pykhov // Problemele Energeticii Regionale. 2018. Vol.1. P. 125-135. DOI: 10.5281/zenodo.1217296
13. Pukelsheim F. The three sigma rule // The American Statistician. 1994. Vol. 48. Iss. 2. P. 88-91.
14. State of the art robotic grippers and applications / K.Tai, A.-R.El-Sayed, M.Shahriari, M.Biglarbegan, S.Mahmud // Robotics. 2016. Vol. 5. № 11. DOI: 10.3390/robotics5020011
15. Sturges H. The choice of a class-interval // Journal of the American Statistical Association. Vol. 21. № 153. P. 65-66.
16. Thermo- and Magneto-elastic Metallic Actuator/Sensor Materials / Y.Furuya, T.Okazaki, M.Wuttig and others // Materials Technology. 2004. № 19 (2). P. 101-108. DOI: 10.1080/10667857.2004.11753072
17. Xu J. Nonlinear dynamic characteristics of MSMA gripper / J.Xu, Y.Kong, Z.Zhu // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2016. Vol. 52. № 3-4. P. 959-966. DOI: 10.3233/JAE-162046

Авторы: К.Д.Крестовников, младший научный сотрудник, open5bit@gmail.com (Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия), Е.О.Черских, младший научный сотрудник, katu0419@mail.ru (Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия), А.И.Савельев, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, saveliev.ais@yandex.ru (Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 24.05.2019.

Статья принята к публикации 20.06.2019.