

УДК 621.86.062

# УПРАВЛЯЕМОЕ МАГНИТНОЕ ГРУЗОЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО С МИНИМАЛЬНЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ И ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**О.К. Елифанов**

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая посадская, 30  
E-mail: office@eprib.ru

**Ю.В. Гречушкин**

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая посадская, 30  
E-mail: office@eprib.ru

**Ключевые слова:** магнитное грузозахватное устройство, магнитное шунтирование, управление, энергоэффективность, энергопотребление, надежность

**Аннотация:** Описывается новое принципиальное решение управляемого магнитного грузозахватного устройства с минимальным энергопотреблением, без движущихся механических частей и постоянного энергопотребления в процессе работы, в котором управление магнитным захватом выполняется за счет шунтирования магнитного потока его постоянных магнитов магнитным потоком обмотки управления под действием маломощного кратковременного импульса электрического тока по сигналу управления автономного робототехнического комплекса. Приводятся аналитические выражения основных взаимосвязанных параметров, обеспечивающих работу и управление рассматриваемого грузозахватного устройства, а также практические результаты оценки его параметров по удельной грузоподъемности и энергоэффективности.

## 1. Введение

Решение задач доставки разнообразных грузов автономными робототехническими транспортными средствами (РТС) с батарейным бортовым электропитанием предполагает использование в них грузозахватных устройств (ГЗУ) различного типа [1-3], среди которых определенными преимуществами обладают управляемые электромагнитные и магнитные ГЗУ [3-5]. Такие ГЗУ осуществляют захват, длительное удержание при транспортировании и отпускание груза по сигналу системы автоматического управления РТС при его доставке.

Магнитные ГЗУ для указанных РТС обладают в процессе выполнения своих функций невысоким энергопотреблением по сравнению с электромагнитными, что обеспечивается использованием в них магнитной энергии постоянных магнитов (ПМ).

В этих ГЗУ, при захвате и сбросе (отпускании) груза, в силу их различных

принципиальных решений, осуществляется либо перенаправление рабочего магнитного потока ПМ встроенным подвижным электромеханическим устройством или электроимпульсным перемагничиванием дополнительных перемагничиваемых ПМ, либо демпфирование (частичное или полное) рабочего магнитного потока ПМ электромагнитным полем обмоток управления (ОУ), подключаемых к сети силового электропитания. Надежность работы указанных ГЗУ определяется в общем случае принципиальным техническим решением конструкции, заданными функциональными параметрами, энергетической и тепловой нагрузкой.

Минимальное энергопотребление и высокая надежность (безотказность) работы ГЗУ, особенно в тяжелых, отличных от нормальных, эксплуатационных условиях, обеспечивается новым принципиальным решением ГЗУ с магнитным захватом магнитоэлектрического типа [5] (МЗ ГЗУ), который осуществляет захват груза, его удержание и транспортирование без энергопотребления от бортовой сети РТС и не содержит движущихся электромеханических составных частей.

## 2. Принципиальное решение МЗ ГЗУ с шунтированием магнитного потока постоянного магнита

Магнитоэлектрический захват (МЗ) ГЗУ [5] содержит магнитную систему с встроенным высококоэрцитивным ПМ и ОУ. Захват груза и его транспортирование осуществляются за счет энергии ПМ, а отпускание (сброс) груза выполняется при подаче в ОУ МЗ по сигналу управления РТС маломощного короткого импульса электрического тока (ИТ), например от емкостного накопителя энергии ГЗУ, заряжаемого от сети батарейного питания РТС. Отпускание груза МЗ осуществляется благодаря шунтированию магнитного потока ПМ под действием магнитного потока ОУ, образованного ИТ. Принципиальное техническое решение цилиндрического МЗ ГЗУ с захватом груза иллюстрируется на рис. 1.

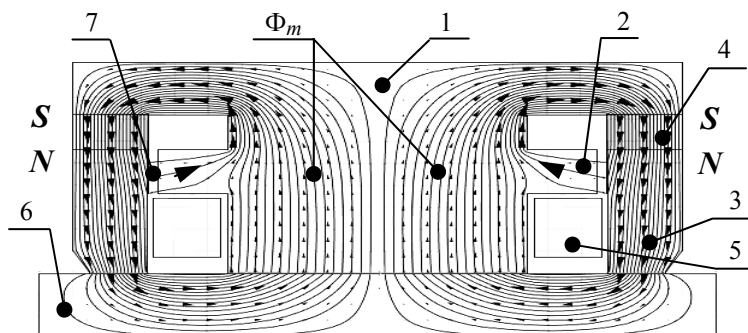
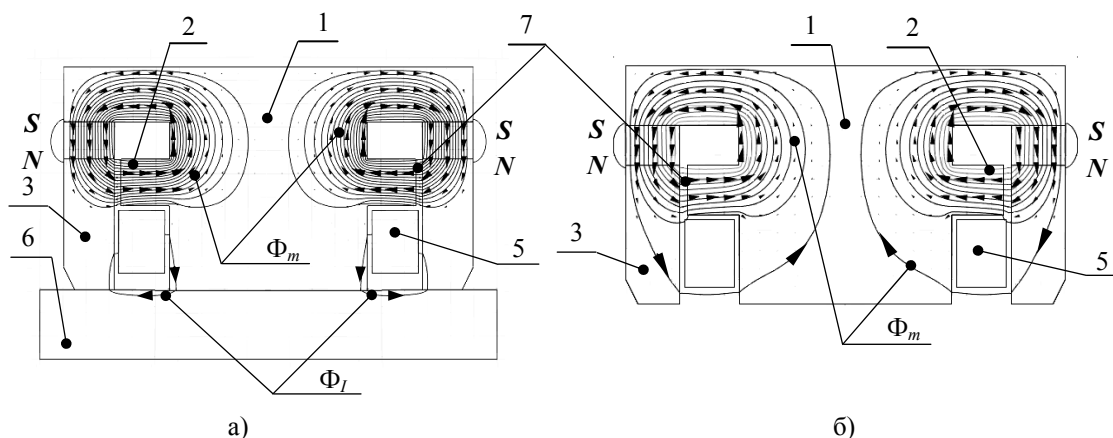


Рис. 1. МЗ ГЗУ с захватом груза.

Магнитная система МЗ ГЗУ (рис. 1) содержит магнитопровод сердечника 1 Т-образного сечения с поперечным полюсом 2 и цилиндрический наружный полюс 3, между которыми размещен кольцевой ПМ 4 с аксиальным направлением намагничивания «S–N». На сердечнике 1 размещена катушка ОУ 5. К наружным поверхностям сердечника 1 и наружного полюса 3 МЗ ГЗУ, образующими общую контактную плоскость, предназначенную для захвата магнитопроводящего груза 6 (или ферромагнитного диска, закрепляемого на немагнитном грузе). Между наружной диаметральной поверхностью поперечного полюса 2 и внутренней цилиндрической поверхностью наружного полюса 3 предусмотрен нормируемый немагнитный зазор 7. Магнитный поток  $\Phi_m$  ПМ создает притягивающую силу при захвате груза, замыкаясь

через наружный полюс, груз и сердечник, как это показано на рис. 1, при этом магнитное сопротивление указанного контура замыкания для  $\Phi_m$  ПМ значительно меньше магнитного сопротивления немагнитного зазора 7 и доля ответвления магнитного потока  $\Phi_m$  через него минимальна.

Для отпущения (сброса) груза, в ОУ по сигналу управления РТС подается короткий ИТ, в результате чего катушкой ОУ создается магнитный поток  $\Phi_I$  встречного для  $\Phi_m$  направления в наружном полюсе 3, в грузе 6 и сердечнике 1 (магнитное сопротивление этого контура замыкания для  $\Phi_m$  существенно возрастает), и согласного направления для  $\Phi_m$  в поперечном полюсе 2. При этом магнитный поток  $\Phi_m$  начинает замыкаться через наружный полюс 3, немагнитный зазор 7, поперечный полюс 2 и сердечник 1, поскольку магнитное сопротивление этого контура замыкания становится значительно меньшим относительно магнитного сопротивления контура замыкания  $\Phi_m$  через груз 6. В результате суммарный магнитный поток в магнитной системе МЗ ГЗУ, проходящий через груз 6, а с ним и притягивающая сила МЗ, существенно снижается вплоть до нуля и груз 6 отделяется от МЗ ГЗУ под собственным весом. По существу магнитный поток  $\Phi_m$  ПМ шунтируется при захваченном МЗ грузе 6. По завершении отпущения (сброса) груза 6 и действия ИТ в ОУ МЗ, магнитный поток  $\Phi_m$  ПМ замыкается через наружный полюс 3, немагнитный зазор 7, поперечный полюс 2 и сердечник 1. Изложенное иллюстрируется на рис. 2 а) и 2 б), на которых приведены контуры замыкания в магнитной системе МЗ ГЗУ магнитных потоков  $\Phi_I$  и  $\Phi_m$ .



**Рис. 2.** МЗ ГЗУ при отпущении (сбросе) груза: а) в момент подачи ИТ в обмотку управления при захваченном грузе, б) груз сброшен, ИТ отсутствует.

Определение, задание и реализация необходимых параметров (геометрических, магнитных, электрических, тепловых, функциональных) конкретного проектного решения конструкции МЗ ГЗУ для уверенного захвата и удержания груза установленной массы в заданных эксплуатационных условиях с достаточным запасом притягивающей силы и осуществление его последующего отпущения (сброса) является итерационным и многокритериальным процессом.

Надежность работы МЗ ГЗУ зависит только от тепловой и электрической нагрузок ОУ, которые незначительны, определяется безотказностью и сроком службы ОУ. Тепловая нагрузка МЗ ГЗУ связана с силой тока в ИТ, характеризуется нагревом ОУ за время действия ИТ и не превышает единиц десятков градусов Цельсия. Электрическая нагрузка по величине ИТ незначительна.

### 3. Управление сбросом груза МЗ ГЗУ

Основной задачей управления ГЗУ является обеспечение однозначного отпускания (сброса) МЗ ГЗУ груза при подаче на ОУ короткого ИТ. Это зависит от достаточности величины силы тока и продолжительности (интервала времени) действия ИТ в ОУ во взаимосвязи с величиной постоянно действующей притягивающей силы МЗ при захвате и транспортировании груза, с энергопотреблением, тепловой загрузкой и с надежностью работы ГЗУ при длительном сроке службы в заданных условиях эксплуатации.

Сила протекающего в ОУ МЗ ГЗУ электрического тока в функции времени  $t$  будет зависеть от величины и длительности приложенного к ОУ от блока управления ГЗУ импульса напряжения сброса (ИН), индуктивности и сопротивления постоянному току ОУ, от изменения индуктивности ОУ и ее потокосцепления с магнитным потоком ПМ, как в функции времени, так и при изменении дистанции (расстояния) при отходе груза от МЗ в процессе его сброса. Величина ИН определяется необходимой и достаточной для шунтирования магнитного потока ПМ магнитным потоком катушки ОУ МЗ под действие протекающего в ней электрического тока в течении ИТ и соответственно снижением до заданной величины силы притяжения МЗ груза относительно его веса, гарантирующего в предусмотренных условиях эксплуатации сброс МЗ груза. Величина ИН определяется из выражения баланса напряжений:

$$U = I(t) \cdot R + L[s(t)] \frac{dI(t)}{dt} + I(t) \frac{dL[s(t)]}{dt} + \frac{d\Psi[s(t)]}{dt} + I(t) \cdot \Delta R(T),$$

где  $U$  – величина ИН сброса, В;  $I(t)$  – сила тока в функции времени, протекающего в ОУ МЗ, А;  $R$  – сопротивление ОУ МЗ постоянному току, Ом;  $s(t)$  – дистанция (длина пути) груза при его отходе от МЗ в процессе отпускания (сброса) в функции времени, м;  $L[s(t)]$  – индуктивность ОУ МЗ в функции  $s(t)$ , Гн;  $\Psi[s(t)]$  – потокосцепление ОУ МЗ с магнитным потоком ПМ в функции  $s(t)$ , Вб;  $\Delta R(T)$  – изменение сопротивление ОУ МЗ постоянному току при изменении температуры  $T$ , °С, окружающей среды, Ом.

Минимальная (достаточная) длительность ИН  $t_{ИН}$  должна быть не менее интервала времени от момента  $t = 0$  подачи ИН на ОУ МЗ для сброса груза до момента времени  $t_c$ , в который дистанция (длина пути) груза  $s(t_c)$  между МЗ и грузом при его отпускании достигает такой величины, что сила притяжения груза МЗ  $F_{МЗ}$  будет существенно меньше веса груза  $F_{Г}$  с учетом текущих эксплуатационных условий, т.е.  $F_{МЗ} \ll F_{Г}$ .

Функция  $s(t)$  определяется по следующим выражениям:

$$s(t) = \int_0^t \left[ \int_0^t a(t) dt \right] dt, a(t) = \frac{F_{МЗ}(t) - F_{Г} + F_v(t)}{m_{Г}}, F_v(t) = V(t)^2 \frac{C_f \rho S}{2},$$

где  $a(t)$  – ускорение движение груза при сбросе, м/с<sup>2</sup>;  $F_{Г} = g \cdot m_{Г}$  – вес груза, Н;  $m_{Г}$  – масса груза, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $F_{МЗ}(t)$  – сила притяжения груза МЗ, Н;  $F_v(t)$  – лобовое сопротивление груза движению при сбросе, Н;  $S$  – площадь сечения груза в плоскости, ортогональной силе тяжести, м<sup>2</sup>;  $C_f$  – аэродинамический коэффициент сопротивления груза при сбросе;  $\rho$  – плотность окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>;

Суммарная электрическая энергия  $E_{МЗ}$ , потребляемая МЗ ГЗУ при сбросе груза, и величина требуемой емкости  $C$  накопителя энергии при среднем значении ИН сброса  $U_{ср}$  определяются из выражений:

$$E_{МЗ} = U_{ср} \int_0^{t_{ИН}} I(t) dt, P_{ср} = \frac{E_{МЗ}}{t_{ИН}}, C = \frac{2P_{ср} t_{ИН}}{U_{ср}^2} \text{ при } \frac{E_{МЗ}}{t_{ИН}} \leq \frac{U_{ср}^2 C}{2t_{ИН}}, U_{ср} = \sqrt{U_1^2 - U_2^2},$$

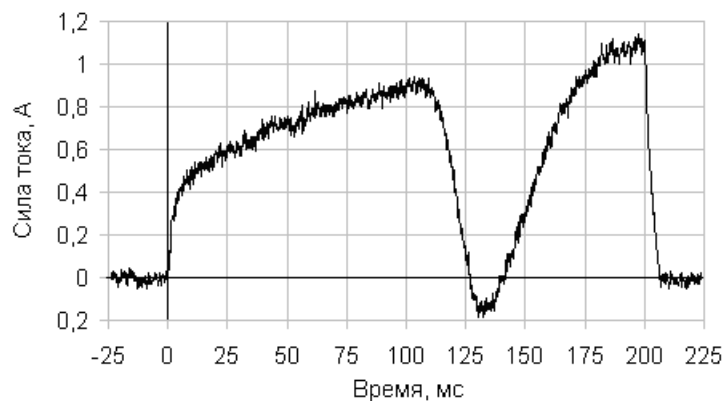
$$U_1 \text{ при } t = 0, U_2 \text{ при } t_{ИН} \geq t_c$$

Верификация магнитных и электрических параметров, характеристик режимов работы МЗ ГЗУ при захвате, удержании и сбросе груза, в т.ч. в различных условиях эксплуатации, выполнялась средствами конечно-элементного моделирования и анализа в программных средах ANSYS Maxwell [6] и ELCUT [7].

Результаты экспериментальных проверок характеристик и параметров образцов МЗ ГЗУ, показали, что энергоэффективность ГЗУ по удельной грузоподъемности составляет не менее 600 Н притягивающей силы на кг массы МЗ ГЗУ, а по электропотреблению в

режиме сброса груза составляет не более 0,003 Вт на 1 Н притягивающей силы МЗ ГЗУ.

В качестве иллюстрации, на рис. 3 представлена осциллограмма электрического тока в цепи ОУ одного из вариантов проектного решения МЗ ГЗУ в режиме сброса груза в течении  $t_{ИН} \approx 200$  мс.



**Рис. 3.** Осциллограмма электрического тока в цепи обмотки управления МЗ ГЗУ в режиме сброса груза.

Характер нарастания силы тока в ОУ МЗ ГЗУ на рис. 3 полностью соответствует физическим процессам, происходящим в течении времени приложения ИН к ОУ при сбросе (отпуске) МЗ груза.

## 4. Заключение

Таким образом, приведенное принципиальное решение магнитного ГЗУ с МЗ магнитоэлектрического типа обеспечивает возможность электропитания от автономного источника пониженной электрической мощности и возможность работы ГЗУ в составе малогабаритных автономных робототехнических комплексов длительного рабочего цикла с повышенными надежностью и ресурсом.

## Список литературы

1. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. СПб.: Лань, 2012. 608 с.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники. СПб.:БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
3. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов. М.: КНОРУС, 2010. 312 с.
4. Деревенко К.А. Грузозахватные постоянные магниты с электроимпульсным управлением. М.: Информэлектро, 1983. 60 с.
5. Константинов О.Я. Магнитная технологическая оснастка. Л.: Машиностроение, 1974. 383 с.
6. Епифанов О.К., Гречушкин Ю.В. Магнитоэлектрический захват груза. Патент RU 2797934. Бюл. № 17. 13.06.2023.
7. ANSYS Maxwell v.15. Руководство пользователя. 2014.
8. Программный продукт ELCUT v.5.9. Руководство пользователя. 2013.