

## О редуцировании механической энергии с помощью магнитного взаимодействия

УЗЯКОВ Р.Н., МАНАКОВ Н.А., ГРЕКОВ Э.Л., КОЛОТВИН А.В., ГОРБАНЬ А.А.

*Рассмотрен подход к редуцированию механической энергии с помощью магнитного взаимодействия через неподвижный магнитопровод – статор. При этом использованы методы анализа и синтеза магнитных механизмов. Анализ известных конструкций магнитных муфт и магнитных редукторов показал высокую эффективность муфт и низкую редукторов, не получивших широкого практического применения. Это и определило постановку задачи повышения эффективности магнитных редукторов. Решение поставленной задачи основано на применении принципа муфт, когда все зубцы ведущего звена находятся одновременно во взаимодействии со всеми зубцами ведомого звена. Для взаимосвязи ведущего и ведомого явнополюсных роторов с постоянными магнитами использован промежуточный неподвижный ферромагнитный статор. Для обеспечения работоспособности статор должен быть дискретным с оптимальной дискретностью, равной трем. Для редуцирования движения значения шага зубцов с разных сторон статора должны отличаться в передаточное число раз, а отношение диаметров ведомого и ведущего роторов должно равняться передаточному числу. Предложенный подход позволил синтезировать ряд статорных магнитных механизмов, которые описаны в полученных патентах и заявках на изобретения. Показана работа синхронного активного соосного магнитного редуктора. Реальная работоспособность данных технических решений подтверждена работающей моделью магнитного редуктора.*

**Ключевые слова:** редуцирование механической энергии, магнитный редуктор, магнитное взаимодействие, магнитный поток, ферромагнитный статор, магнитопровод

Вопрос о передаче механической энергии с помощью магнитного взаимодействия разрабатывается уже не одно столетие. Наиболее полная систематизация таких механизмов изложена в справочнике [1], где представлены конструктивные схемы магнитных механизмов, области их применения, примеры конструкций и последовательность электромагнитных и механических расчетов.

Магнитные и электромагнитные механизмы нашли применение в качестве устройств бесконтактной передачи механической энергии в герметичные объемы аппаратов с вакуумом, высоким давлением или токсичными и агрессивными средами. Основными устройствами, используемыми для этих целей, являются разнообразные магнитные и электромагнитные муфты, работающие в широком диапазоне передаваемых моментов и мощностей.

Магнитные редукторы не получили широкого практического применения из-за малого значения передаваемого момента, обусловленного тем, что в магнитном взаимодействии находится малое число зубцов [1].

В настоящее время наиболее разработанными и используемыми на практике являются магнитные редукторы, построенные по схеме волновых редукторов [2–4]. Теоретические основы работы этих редукторов наиболее полно изложены в публика-

циях действительного члена АЭН РФ А.А. Афанасьева [5, 6].

Настоящая работа посвящена анализу возможности повышения эффективности магнитных редукторов. Рассмотрим передачу вращающего момента на примере магнитного взаимодействия двух зубцов (рис. 1).

Без внешнего воздействия (при холостом ходе) относительное смещение осей полюсов (зубцов) отсутствует, существует только равнодействующая сил притяжения полюсов (зубцов)  $F$ . При воздействии движущего момента и момента сопротивления возникает рассогласование  $x$  осей полюсов (зубцов). При этом изменяется магнитный поток в зазоре. Равнодействующая сил притяжения  $F_\gamma$  в этом

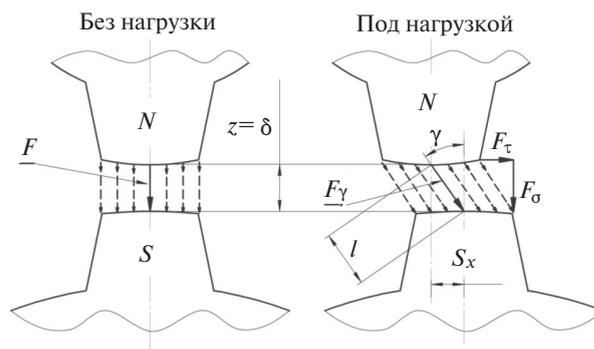


Рис. 1. Схема магнитного взаимодействия двух зубцов

случае направлена под углом  $\gamma$  к оси зубцов. В результате возникает касательная составляющая  $F_{\tau}$  силы, стремящаяся уменьшить угол рассогласования.

При увеличении смещения  $x$  составляющая  $F_{\tau}$  возрастает, сила притяжения  $F_{\gamma}$  уменьшается вследствие увеличения общего расстояния между полюсами (зубцами). Следовательно, в целом  $F_{\tau}$  зависит от смещения  $x$  нелинейно и, как следует из работы [7], имеет максимум при некотором значении  $x$ .

В случае магнитной муфты (рис. 2) магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом (или электромагнитом), выходит из полюса  $N$ , проходит через левые (по схеме) зубцы внутренней полумуфты, воздушный зазор, входит в зубцы внешней полумуфты, проходит через ее корпус, выходит из ее зубцов, проходит воздушный зазор и через правые зубцы внутренней полумуфты замыкается на полюс  $S$  магнита. В магнитной муфте во взаимодействии одновременно находятся много пар зубцов, поэтому результирующий момент касательных сил  $F_{\tau}$  имеет большое значение.

В магнитном редукторе (рис. 3) магнитный поток замыкается аналогично муфте, но во взаимодействии находится или одна пара зубцов с минимальным расстоянием, или две пары, но с большим расстоянием. По этой причине значение передаваемого момента мало.

Такое несоответствие в работе магнитных муфт и магнитных редукторов, построенных по принципу механических, и определило постановку задачи – повышение эффективности магнитных редукторов.

Для решения задачи авторы отказались от принципа механических редукторов, когда один зубец ведущего звена взаимодействует с одним зубцом ведомого звена. Было решено использовать принцип муфты, когда все зубцы ведущего звена

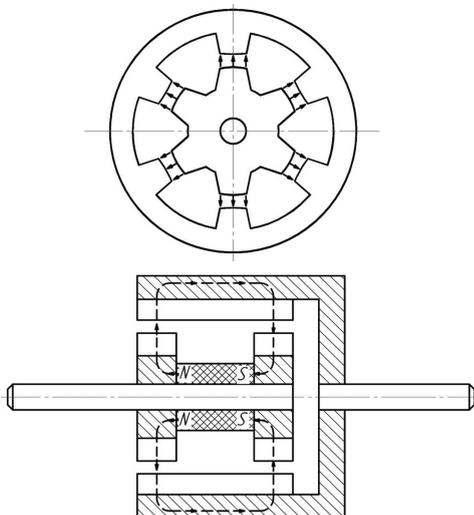


Рис. 2. Схема магнитной муфты

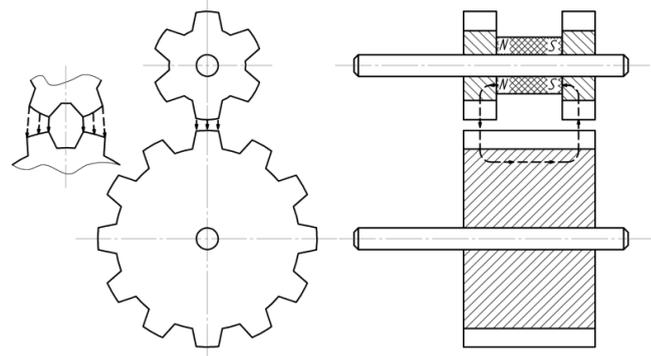


Рис. 3. Схема магнитного редуктора

(полумуфты) находятся одновременно во взаимодействии со всеми зубцами ведомого звена (полумуфты). Для механического редуктора это невозможно, а можно ли реализовать такое взаимодействие для магнитного редуктора?

Вернемся к магнитному взаимодействию двух зубцов. Если расстояние между полюсами (зубцами) увеличивать (рис. 4), то сила взаимодействия будет стремиться к нулю, так как магнитная проницаемость воздуха мала. Но если зазор между полюсами (зубцами) заполнить ферромагнитным материалом (назовем его статором), то сила взаимодействия резко возрастет, так как магнитная проницаемость ферромагнетиков на несколько порядков больше магнитной проницаемости воздуха. Таким образом, появляется возможность передавать магнитное взаимодействие на большее расстояние.

Рассмотрим схему взаимодействия подковообразных магнитов через ферромагнитный экран – статор (рис. 5). При большой толщине статора взаимодействие между магнитами минимально, так как магнитный поток замыкается в основном между собственными полюсами магнитов. Таким образом, перемещение одного подковообразного магнита вдоль статора не вызовет перемещения второго.

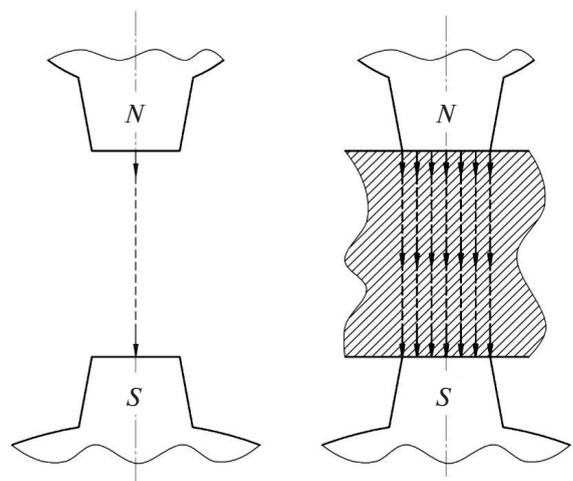


Рис. 4. Схема магнитного взаимодействия при увеличенном зазоре

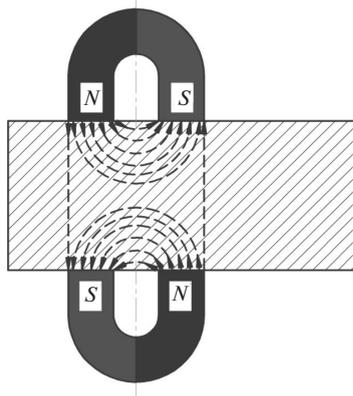


Рис. 5. Схема магнитного взаимодействия подковообразных магнитов через ферромагнитный элемент

Но если статор разделить на части, то магнитный поток в основном будет замыкаться между полюсами разных магнитов, даже при большой толщине статора (рис. 6).

При дискретном статоре перемещение одного подковообразного магнита вдоль статора вызовет перемещение второго подковообразного магнита. Таким образом, реализуется возможность передавать движение с помощью магнитного взаимодействия на некоторое расстояние при практически полном использовании энергии магнитов.

С целью увеличения плавности перемещения ведомого звена степень дискретности статора должна быть максимальной, при этом суммарная площадь дискретных ферромагнитных элементов статора будет минимальной, так как между ними должен быть существенный воздушный зазор. В результате силы взаимодействия магнитов будут минимальны.

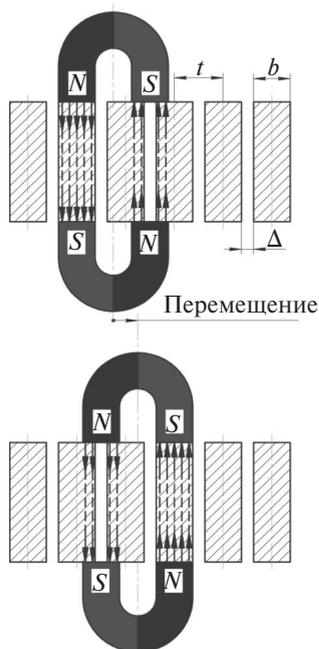


Рис. 6. Схема магнитного взаимодействия подковообразных магнитов через дискретные ферромагнитные элементы статора

Поэтому для получения максимальной силы взаимодействия степень дискретности статора должна быть минимально возможной. При степени дискретности, равной единице (при ее отсутствии), получаем схему, представленную на рис. 5. Если разделить статор на две части, то передача движения будет невозможна. Логично определять дискретность статора в зависимости от размеров магнитов. Примем ширину дискретного ферромагнитного элемента статора  $b$  равной ширине полюса магнита для максимального замыкания магнитного потока одной пары полюсов, шаг между ними  $t$ , тогда зазор между элементами будет равен  $\Delta = t - b$ . При этом вторая пара полюсов будет замыкаться через один или два таких же элемента. Вариант с двумя элементами (дискретность статора 3) обеспечивает передачу движения, так как при этом не происходит разрыва магнитного потока. Для этого варианта расстояние между осями полюсов магнита должно равняться  $t + (b + \Delta)/2$  (рис. 6).

Это решение было проверено с помощью моделирования методом конечных элементов в программе FEMM 4.2. В виртуальном эксперименте рассмотрена линейная модель на неодимовых магнитах. Тип магнита — NdFeB 37 MGOe; характеристики: магнитная проницаемость 1,048, коэрцитивная сила 950000 А/м, электрическая проводимость 0,667 МСм/м.

Размеры магнитов (длина, толщина, высота) —  $a \times b \times c = 30 \times 5 \times 10$  мм; торцевое ярмо:  $a \times b \times c = 60 \times 25 \times 10$  мм, материал — шихтованная сталь US Steel Type 2-S, толщина листа 0,6 мм; статор: материал — шихтованная сталь US Steel Type 2-S, толщина листа 0,6 мм, размеры —  $b \times c = 5 \times 10$  мм, длина варьировалась; зазор между элементами статора 5 мм; ширина основного воздушного зазора также варьировалась в эксперименте.

**Обработка результатов виртуальных экспериментов** проведена с использованием программы CurveExpert 2.6. Получены следующие зависимости:

сдвигающей силы  $F_\tau$  от размера воздушного зазора  $\delta$ ; рассмотрен вариант для  $l = 20$  (рис. 7):

$$F_\tau = \frac{f}{0,016 + 0,0056\delta + 0,00011\delta^2}, \quad (1)$$

где  $f - 1, Н$ ;  $\delta$  — основной воздушный зазор, мм;

сдвигающей силы  $F_\tau$  от длины магнитопроводов  $l$ ; рассмотрен вариант для  $\delta = 1$  мм (рис. 8):

$$F_\tau = \frac{f}{0,011 + 0,0006l}, \quad (2)$$

где  $f - 1, Н$ ;  $l$  — длина магнитопроводов, мм;

зависимость изменения сдвигающей силы  $F_\tau$  от величины смещения  $x$  (рис. 9):

Зависимость сдвигающей силы  $F_\tau(H)$  от размера основного воздушного зазора  $\delta$  и длины элементов статора  $l$

Основной воздушный зазор (мм)	Значение $F(H)$ при длине элементов статора (мм)						
	5	10	20	30	40	50	60
0,25	90,6	76	56,7	45,3	37,5	31,7	27,5
0,5	83,8	69,7	51,9	41,3	34,1	29	25,2
1	72,1	59,5	43,7	34,7	28,7	24,4	21,4
2	54,2	43,8	31,8	25	20,6	17,5	15,3
4	32,3	25,5	18	14	11,4	9,6	8,2

Зависимости изменения сдвигающей силы  $F_\tau(H)$  от смещения  $x$  (мм) нижнего магнита относительно верхних магнитов:

$x$ , мм	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
$F_\tau(H)$	0,11	15,7	20,5	21,2	23,8	31,9	34,6	31,9	23,8	21,2	20,5	15,7	0,11

$$F_\tau = 32,4\sin(0,1x) + 4,98\sin(0,53x). \quad (3)$$

Вторая гармоника в (3) связана с дискретностью статора.

Результаты виртуального эксперимента подтверждают работоспособность предложенного решения.

Представленная на рис. 6 схема обеспечивает передачу движения с передаточным отношением, равным единице, а поставленная задача – редуцирование движения, т.е. пропорциональное уменьшение перемещения (скорости, угловой скорости) с соответствующим увеличением силы (вращающего момента).

Рассмотрим, как может быть решена первая часть поставленной задачи – уменьшение перемещения (скорости). Допустим, необходимо получить передаточное отношение, равное двум. Тогда ширина ферромагнитных элементов статора, их шаг и ширина подковообразного магнита должны быть в два раза меньше с одной стороны, чем с другой. Для реализации этого решения (рис. 10) выполним

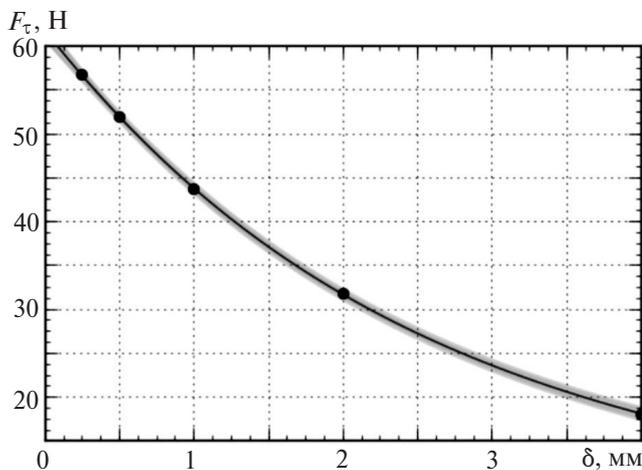


Рис. 7. Зависимость сдвигающей силы  $F_\tau$  от размера воздушного зазора  $\delta$

статор из трех одинаковых параллельных ферромагнитных элементов  $A, B$  и  $C$ , имеющих разные значения ширины и шага зубцов с двух сторон. При этом необходимо обеспечить большой зазор между элементами  $A, B$  и  $C$ . Суммарная магнитная энергия магнитов, расположенных с разных сторон от статора, должна быть одинаковой, поэтому сверху (по схеме) расположены два магнита меньших размеров. Перемещение нижнего (по схеме) магнита приведет к изменению полярности ферромагнитных элементов статора  $A, B, C$ , что вызовет перемещение верхних магнитов со скоростью, в 2 раза меньшей, чем у нижнего магнита. Таким образом, реализуется возможность изменять скорость.

Вторая часть поставленной задачи редуцирования движения – пропорциональное увеличение силы (вращающего момента). Как известно, силу можно увеличить с помощью рычага. Если расположить точку опоры под нижним (по схеме рис. 10) магнитом, то плечо до верхних магнитов будет больше, и при равных по значению касательных

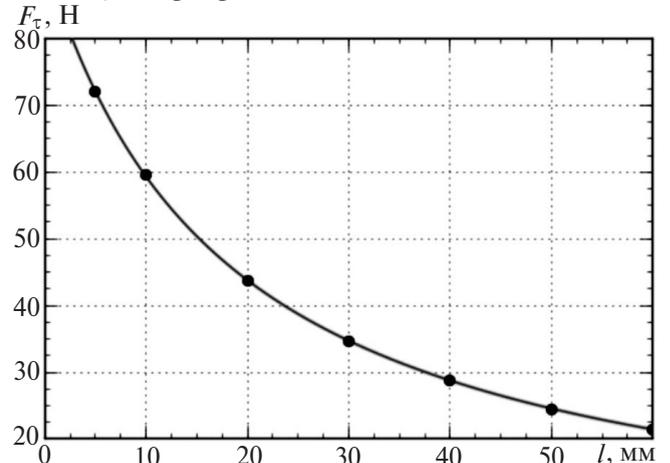


Рис. 8. Зависимость сдвигающей силы  $F_\tau$  от длины магнитопроводов  $l$

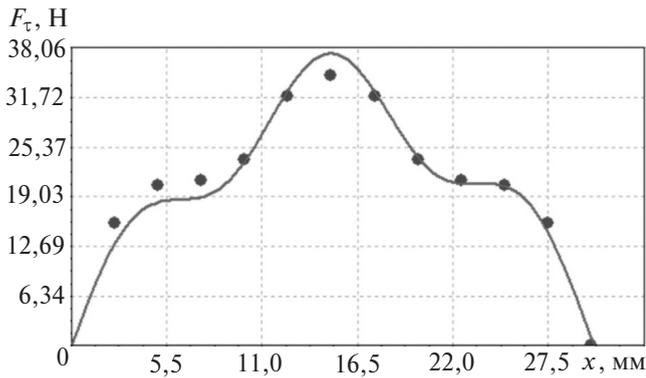


Рис. 9. Зависимость изменения сдвигающей силы  $F_\tau$  от смещения  $x$

составляющих  $F_\tau$  получим больший вращающий момент. «Свернув» конструкцию в кольцо, получаем редуктор, т.е. рычаг Архимеда для вращательного движения; выигрываем во вращающем моменте, а проигрываем в угловой скорости.

Использование предложенных принципов построения магнитных механизмов позволило разработать ряд устройств, таких как: соосный магнитный редуктор-мультипликатор<sup>1</sup>; синхронный активный магнитный редуктор-мультипликатор<sup>2</sup>; синхронный реактивный магнитный редуктор-мультипликатор<sup>3</sup>; статорная магнитная муфта<sup>4</sup>; асинхронная статорная магнитная муфта; статорный магнитный редуктор-мультипликатор с внутренним зацеплением.

Рассмотрим работу одного из них. На рис. 11 представлена предложенная авторами статьи схема синхронного активного соосного магнитного редуктора [8]. Он состоит из следующих основных элементов: быстроходного ротора 1, установленного на быстроходном валу 6, содержащего две пары полюсов; тихоходного ротора 2, установленного на тихоходном валу 7, содержащего восемь пар полюсов; статора, состоящего из трех ферромагнитных магнитопроводов 3, 4 и 5, установленных соосно с зазором между ними. Между роторами и статором — основной воздушный зазор минимально возможного размера. Каждый ферромагнитный магнитопровод имеет со стороны быстроходного ротора зубцы, число которых равно числу пар полюсов быстроходного ротора (для представленной схемы — два), а со стороны тихоходного ротора — зубцы, число которых равно числу пар полюсов тихоходного ротора (для представленной схемы — восемь).

Редуктор работает следующим образом. Магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами быстроходного ротора, замыкается с магнит-

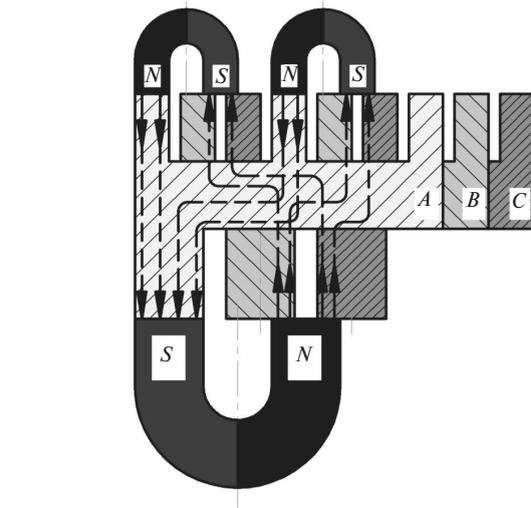


Рис. 10. Схема редуцирования движения с использованием магнитного взаимодействия через ферромагнитный трехэлементный статор

ным потоком, создаваемым постоянными магнитами тихоходного ротора через трехэлементный ферромагнитный магнитопровод — статор. Вращение быстроходного ротора приводит к появлению вращающегося магнитного поля в цилиндрических поверхностях статора с зубцами. Тихоходный ротор при этом синхронно поворачивается так, чтобы угол рассогласования его полюсов и магнитного поля в зубцах статора был минимальным. При приложении момента сопротивления возникает рассогласование осей полюсов роторов и изменение магнитных потоков в воздушных зазорах (см. выше). Результирующий момент касательных сил в воздушных зазорах всех полюсов роторов аналогичен моменту в синхронной активной многополюсной цилиндрической муфте с магнитом «звездочка».

Большее, чем у быстроходного ротора в передаточное число раз число полюсов тихоходного ротора, обеспечивает соответствующее изменение угловых скоростей.

Трехэлементный статор обеспечивает направленное вращение магнитного поля (как в трехфазном электродвигателе) и одновременное сцепление

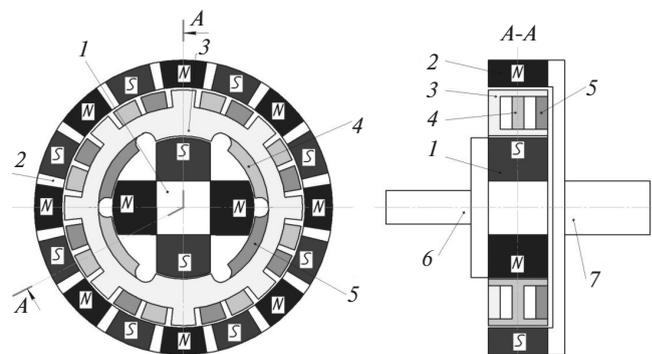


Рис. 11. Синхронный активный соосный магнитный редуктор

<sup>1</sup> Патент РФ № 2579443 от 20.03.2015. — БИ, 2016, № 10.

<sup>2</sup> Патент РФ № 2579756 от 13.04.2015. — БИ, 2016, № 10.

<sup>3</sup> Патент РФ № 2629003 от 16.09.2015. — БИ, 2017, № 24.

<sup>4</sup> Патент РФ № 2629004 от 26.04.2016. — БИ, 2017, № 24.

через статор магнитных потоков всех полюсов быстроходного и тихоходного роторов. Вращающий момент на тихоходном роторе будет больше благодаря большому радиусу расположения его магнитов.

Среди зарубежных аналогов можно выделить изобретение группы ученых из испанского университета Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). В 2014 г. в рамках проекта MAGDRIVE был создан магнитный редуктор с передаточным отношением, равным 20, при этом его максимальный момент на тихоходном роторе равен 3 Н·м. В серийное производство данное устройство не поступило.

Если сравнивать с уже выпускаемыми магнитными редукторами, то предложенная в статье конструкция наиболее близка к мотор-редукторам серии КОМПАСС немецкого производства. Устройство выпускается с диапазоном передаточных отношений от 3,8 до 9,66, при этом максимальный момент на тихоходном роторе достигает 68 Н·м.

Работоспособность представленных в статье разработок подтверждена работающей моделью магнитного редуктора (рис. 12), ее основные размеры: диаметр быстроходного ротора 85 мм; ширина полюса быстроходного ротора 35 мм; диаметр тихоходного ротора 125 мм; ширина полюса тихоходного ротора 25 мм.

В модели используются неодимовые магниты, код материала N38:

форма — кольцо, размеры:  $D \times d \times H = 60 \times 24 \times 10$ ; магнитная индукция материала  $B_r = 1,21$  Тл; магнитная энергия  $B_H \max = 287$  кДж/м<sup>3</sup>; коэрцитивная сила — 955 кА/м. При данных параметрах измеренный момент на тихоходном роторе составил 1,25 Н·м.

Редуктор имеет низкую эффективность, так как проектировался только для подтверждения работоспособности предложенного метода. Относительно малое значение передаваемого момента связано с несовершенством конструкции, например с тем, что статор редуктора изготовлен из цельного металла, а не из шихтованной стали.

Исследование эффективности и оптимизация статорных магнитных механизмов — вопрос дальнейших исследований авторов статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганзбург Л.Б., Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1980, 364 с.
2. А.с. № 280142 (СССР). Магнитная передача/ Р.Ю. Бансевичус. — БИ, 1970, № 27.
3. А.с. № 699621 (СССР). Магнитный редуктор/ Л.Б. Ганзбург, Е.О.Давыдов, А.А. Лысов и др. — БИ, 1979, № 43.
4. Патент РФ № 2526540. Электромагнитный редуктор/ А.А. Афанасьев, В.А. Чихняев. — БИ, 2014, № 24.

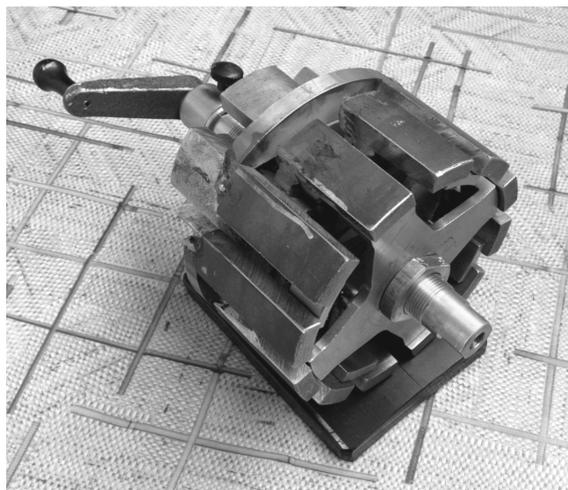


Рис. 12. Действующая модель статорного магнитного редуктора

5. Афанасьев А.А. Расчет магнитного мультипликатора. — Электричество, 2013, № 9, с. 42—49.

6. Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Никитин В.М. Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора. — Электричество, 2014, № 4, с. 62—67.

7. Ганзбург Л.Б., Глуханов Н.П., Рейфе Е.Д., Федотов А.И. Механизмы с магнитной связью. — Л.: Машиностроение, 1973, 272 с.

[11.12.2017]

*А в т о р ы:* **Узяков Рафаэль Наильевич** окончил Оренбургский политехнический институт в 1984 г. Кандидатскую диссертацию «Прогнозирование коррозионного состояния оборудования Оренбургского газоперерабатывающего завода» защитил в 2002 г. Доцент кафедры машиноведения Оренбургского государственного университета (ОГУ).

**Манаков Николай Александрович** окончил Новосибирский государственный университет в 1969 г. Докторскую диссертацию «Процессы перемагничивания быстрозакаленных сплавов высокоанизотропных редкоземельных магнетиков» защитил в Институте физики металлов Уральского отделения РАН в 1994 г. Профессор кафедры общей физики ОГУ.

**Греков Эдуард Леонидович** окончил Оренбургский государственный университет в 1996 г. Кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование электропривода основных механизмов экскаваторов по системе НПЧ-АД на базе эквивалентных шестипульсных схем» защитил в 2003 г. Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники ОГУ.

**Колотвин Александр Викторович** окончил Оренбургский государственный технический университет в 1995 г. Кандидатскую диссертацию «Комплексный анализ и управление экологическим состоянием регионов» защитил в 2005 г. Заведующий кафедрой машиноведения ОГУ.

**Горбань Александр Анатольевич** окончил Оренбургский государственный университет в 2012 г. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники ОГУ.

## Mechanical Energy Reduction by Using Magnetic Interaction

**UZYAKOV Rafael' N.** (Orenburg State University (OSU), Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**MANAKOV Nikolai A.** (OSU, Orenburg, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**GREKOV Eduard L.** (OSU, Orenburg, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**KOLOTVIN Aleksandr V.** (OSU, Orenburg, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**GORBAN' Aleksandr A.** (OSU, Orenburg, Russia) – Ph. D. Student

*An approach to constructing mechanical energy reduction gears based on magnetic interaction through a fixed magnetic core (a stator) is considered. The proposed approach has been developed proceeding from the methods for analyzing and synthesizing magnetic mechanisms. An analysis of the well-known designs of magnetic clutches and magnetic reduction gears has shown that magnetic clutches feature high efficiency. On the other hand, magnetic reduction gears feature poor efficiency, due to which they have not received wide practical use. This circumstance generated the need to seek ways for improving the efficiency of magnetic reduction gears. The proposed solution of the problem is based on applying the principle of couplings, according to which all teeth of the driving link are in simultaneous interaction with all teeth of the driven link. Interconnection between the driving and driven salient-pole rotors with permanent magnets is set up through an intermediate fixed ferromagnetic stator. For ensuring its operability, the stator must have a discrete design with the optimal discreteness equal to three. For reducing the motion, the tooth pitch values on different sides of the stator must differ from each other by the gear ratio, and the ratio of the driving and driven rotor diameters must be equal to the same gear ratio. By applying the proposed approach, a number of stator magnetic mechanisms have been synthesized, which are described in the received patents and applications for invention. The operation of a synchronous active coaxial magnetic reduction gear is shown. The actual operability of these technical solutions has been confirmed by an operating magnetic reduction gear model.*

**Key words:** *mechanical energy reduction, magnetic reduction gear, magnetic interaction, magnetic flux, ferromagnetic stator, magnetic core*

### REFERENCES

1. **Ganzburg L.B., Fedotov A.I.** *Proyektirovaniye elektromagnitnykh i magnitnykh mekhanizmov: Spravochnik* (Design of electromagnetic and magnetic mechanisms: Handbook). Leningrad, Publ. «Mashinostroyeniye», 1980, 364.
2. **C.a. No. 280142 (USSR).** *Magnitnaya peredacha* (Magnetic transmission)/R.Yu. Bansevichus. Bulletin of inventions, 1970, No. 27.
3. **C.a. No. 699621 (USSR).** *Magnitnyi reduktor* (A Magnetic reductor)/L.B. Ganzburg, Ye.O. Davydov, A.A. Lysov et al. Bulletin of inventions, 1979, No. 43.
4. **Patent RF No. 2526540.** *Elektromagnitnyi reduktor* (Electromagnetic reductor)/A.A. Afanas'yev, V.A. Chikhnyayev. Bulletin of inventions, 2014, No. 24.
5. **Afanas'yev A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 9, pp. 42–49.
6. **Afanas'yev A.A., Yefimov V.V., Nikitin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 4, pp. 62–67.
7. **Ganzburg L.B., Glukhanov N.P., Reife Ye.D., Fedotov A.I.** *Mekhanizmy s magnitnoi svyaz'yu* (Mechanisms with the magnetic coupling). Leningrad, Publ. «Mashinostroyeniye», 1973, 272 p.

[11.12.2017]