

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **034418**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.02.05

(51) Int. Cl. **H01F 7/16** (2006.01)
H02K 33/16 (2006.01)

(21) Номер заявки
201490572

(22) Дата подачи заявки
2012.07.12

(54) МАГНИТНЫЙ ПРИВОД

(31) **A 1260/2011**

(32) **2011.09.05**

(33) **AT**

(43) **2014.08.29**

(86) **PCT/EP2012/063713**

(87) **WO 2013/034339 2013.03.14**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
СЕХ ЛИМИТЕД (MT)

(72) Изобретатель:
**Эйн Жереми, Маршнер Фон
Хельмрайх Мартин (MC)**

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) **DE-A1-10003928
DE-A1-10207828
WO-A1-2007063222
DE-U1-202009014192
US-A1-2004005222**

(57) Магнитное устройство содержит по меньшей мере один статор (1, 1') и по меньшей мере один транслятор (2), при этом транслятор (2) выполнен с возможностью движения относительно статора (1, 1') в направлении (6) движения транслятора, при этом направление (6) движения транслятора ориентировано к статору (1, 1'), при этом по меньшей мере один статор (1, 1') и один транслятор (2) ориентированы вдоль одной оси, при этом магнитное устройство содержит управляющее устройство, при этом управляющее устройство содержит устройство для управления расстоянием $r > 0$ транслятора до статора при работе магнитного устройства относительно возникающей между статором и транслятором схемы действия сил, транслятор (2) установлен с возможностью движения в направлении (6) движения транслятора вдоль линейно проходящей оси движения транслятора относительно статора (1, 1'), при этом по меньшей мере один статор (1, 1') и транслятор (2) ориентированы вдоль оси движения транслятора.

B1**034418****034418****B1**

Данное изобретение относится к магнитному приводу или генератору, содержащему по меньшей мере один магнит статора и по меньшей мере один магнит преобразователя, при этом магнит преобразователя выполнен с возможностью движения преобразователя вдоль линейно проходящей оси движения преобразователя в направлении движения магнита преобразователя, при этом направление движения магнита преобразователя задано направляющим блоком и ориентировано в направлении к магниту статора, при этом по меньшей мере один магнит статора и магнит преобразователя ориентированы вдоль линейно проходящей оси движения преобразователя.

В последующем с целью упрощения магнит преобразователя обозначается коротко преобразователем, а магнит статора - статором.

Возможности применения магнитного устройства согласно изобретению состоят в применении в качестве магнитного привода, в качестве генератора или в качестве резистора, который создает силу противодействия силе, воздействующей на резистор снаружи. При применении в качестве магнитного привода с помощью приводной оси может выполняться механическая работа.

Магнитные приводы из уровня техники базируются на принципе использования магнитного диполя. За счет активации сил отталкивания и сил притяжения обеспечивается движение магнита преобразователя относительно магнита статора. Это движение может быть направленным в обход статора, линейным или ротационным движением магнита преобразователя или направленным к магниту статора, колебательным движением магнита преобразователя. Магнитные приводы согласно уровню техники, которые основываются на указанном последнем движении магнита преобразователя, характеризуются тем, что магнит преобразователя по меньшей мере в одном конечном положении находится в контакте с магнитом статора. В магнитных приводах согласно уровню техники преобразователь в своем конечном положении и статор действуют как один магнит, так что статор и преобразователь можно отделять друг от друга лишь с помощью повышенного расхода энергии.

В JP 2006325381 раскрыто магнитное устройство, содержащее по меньшей мере один транслятор, который выполнен с возможностью движения по меньшей мере между двумя статорами, при этом ось движения преобразователя проходит через статоры. Движение преобразователя ограничено с помощью распорных элементов, предусмотренных на статорах. Распорные элементы служат для уменьшения шумов генератора тока и механических шумов, вызываемых, например, контактом статора с преобразователем.

В JP 2006345652 приведено описание устройства управления движением иглы, направляемой с помощью магнита. Однако не раскрывается управление движением иглы относительно вызываемой магнитом схемы действия сил.

В US 20060049701 раскрывается магнитное устройство, при этом ось движения преобразователей не проходит через статоры. Преобразователи перемещаются сбоку от статоров, из чего следует, что возникающая между статорами и преобразователем схема действия сил ориентирована не параллельно направлению движения преобразователя. Несмотря на отсутствие описания об управлении движением преобразователя относительно возникающей между преобразователем и статором схемы действия сил, раскрытое в US 20060049701 устройство имеет вследствие ориентации схемы действия сил по сравнению с движением преобразователя значительно меньший коэффициент полезного действия, чем в рассматриваемом ниже устройстве.

В JP 2010104078 приведено описание магнитного устройства, при этом движение преобразователя управляется с помощью распорного элемента. Распорный элемент имеет форму, которая не оказывает отрицательного влияния на возникающую между статором и преобразователем схему действия сил за счет своего присутствия.

RO 126256 относится к магнитному устройству, которое по сравнению с рассматриваемым в последующем магнитным устройством не содержит управляющего устройства для управления движением преобразователя.

В JP 2002335662 раскрыто магнитное устройство, которое также не содержит управляющего устройства для управления движением преобразователя.

В DE 10003928 не раскрывается управляющее устройство, предназначенное для дистанцирования преобразователем и статором в зависимости от силы, возникающей между статором и преобразователем во время работы магнитного устройства, описываемого в DE 10003928. В DE 10003928 не описывается специальное воздействие подобного управляющего устройства, а именно постоянного функционирования статора и преобразователя в качестве отдельных магнитов.

В DE 10003928 на фиг. 1 показано, что преобразователь (в DE 10003928 на фиг. 1 - якорь 8) дистанцирован от статора (в DE 10003928 на фиг. 1 - электромагнит 6). Дистанцирование достигается с помощью дистанцирующего элемента, не обозначенного однако на фиг. 1 и 3 документа DE 10003928 ссылкой на позицию.

В DE 10003928 на фиг. 2 показана схема сил, действующая между статором и преобразователем. В описании к фиг. 2 документа DE 10003928 раскрывается, что области, снабженные ссылкой на позицию 36, являются регулируемыми, так как действующая на преобразователь сумма сил притяжения по отношению к расположенному на расстоянии статору и силы упругости больше, чем силы, противодей-

вующие движению (в DE 10003928 на фиг. 2 снабжены ссылочными позициями 39, 40).

Однако в описании не раскрывается взаимосвязь между выше указанным дистанцирующим элементом, показанным в DE 10003928 на фиг. 1, и характером изменения сил, описанным в отношении фиг. 2. Следовательно, из документа DE 10003928 не известно управление расстоянием посредством дистанцирующего элемента, показанного на фиг. 1, в отношении силы, возникающей между преобразователем и статором.

В п.1 формулы изобретения документа DE 10207828 A1 описывается якорь, ориентированный вертикально относительно направления своего движения (на фиг. 1 DE 10207828 снабжен ссылочной позицией 41). Упомянутый в DE 10207828 якорь функционирует в качестве преобразователя в магнитном устройстве, раскрываемом в документе DE 10207828.

В абзаце 0042 описания DE 10207828 раскрывается применение дистанцирующих элементов для уменьшения удерживающей силы подъемного магнита. На фиг. 1 показано, что дистанцирующие элементы (в DE 10207828 на фиг. 1 снабжены ссылочными позициями 45, 46) расположены между преобразователем и статором и уменьшают за счет их наличия удерживающую силу.

В DE 10207828 не раскрывается размещение на расстоянии преобразователя и статора так, что статор и преобразователь функционируют в качестве отдельных магнитов. В результате между преобразователем и статором не воздействует удерживающая сила.

На фиг. 1 документа WO 2007063222 A1 показан дистанцирующий элемент, обладающий высотой H. В описании к фиг. 1 (см. стр. 7 описания, последний абзац) приводится назначение дистанцирующего элемента, а именно увеличение срока службы магнитного устройства. В последующем абзаце на стр. 3 описания раскрывается, что дистанцирующий элемент предназначен для компенсации неточностей. В WO 2007063222 A1 не упоминается воздействие дистанцирующего элемента для обеспечения функционирования статора и преобразователя в виде отдельных магнитов.

На фиг. 1 DE 202009014192 U1 показано, что полюсные диски (в DE 202009014192 на фиг. 1 снабжены ссылочными позициями 14, 16) преобразователя контактируют с ярмом статора (в DE 202009014192 на фиг. 1 снабжен ссылочной позицией 26). Результирующий магнитный поток показан в DE 202009014192 U1 на фиг. 4. На фиг. 4 документа DE 202009014192 U1 показано, что преобразователь и статор контактируют друг с другом и тем самым не располагаются на расстоянии $r > 0$ относительно друг друга.

В US 2004005222 описывается схема коммутации для устройства управления. В документе US 2004005222 не раскрывается размещение статора и преобразователя на расстоянии друг от друга, так что преобразователь и статор при работе магнитного устройства всегда функционируют в качестве отдельных магнитов.

В основу изобретения положена задача создания магнитного устройства, в частности магнитного привода, генератора или резистивного элемента, которое отличается более высоким коэффициентом полезного действия, чем известные из уровня техники электромагнитные двигатели.

Согласно изобретению высокий коэффициент полезного действия достигается тем, что магнитный привод содержит управляющее устройство, при этом управляющее устройство содержит следующие элементы:

распорный элемент, выполненный с возможностью позиционирования между магнитом статора и магнитом преобразователя, и/или

механическое устройство, ограничивающее движение магнита преобразователя и противодействующее силам между магнитом статора и магнитом преобразователя, и/или

устройство измерения расстояния и/или устройство измерения времени, с помощью которых измеряются положения магнита преобразователя относительно магнита статора и/или временные свойства магнитов, причем посредством управляющего устройства в зависимости от упомянутых значений может обеспечиваться возможность изменения поляризации магнита статора и/или магнита преобразователя и/или напряженность поля магнита статора и/или магнита преобразователя, и

управляющий блок, посредством которого определяется минимальное расстояние $r_{\min} > 0$ с учетом силы, возникающей между статором, магнитом статора и магнитом преобразователя, так что действующая на магнит преобразователя результирующая сила в положении X_t магнита преобразователя является максимальной, при этом для действующего на магнит преобразователя силы справедливо соотношение

$$F_{\text{repulsion}}(X_t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{\left[\frac{q_{sla}(X_t)q_{tb}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \right]}{\left[\frac{q_{slb}(X_t)q_{ta}(X_t)}{\left(X_t - \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \right]} - \frac{\left[\frac{q_{sla}(X_t)q_{ta}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} \right]}{\left[\frac{q_{slb}(X_t)q_{tb}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_t - L_s}{2}\right)^2} \right]} \right\}$$

где $q_{sla}(X_t)$ и $q_{slb}(X_t)$ - силы магнитных полюсов магнитов статоров,
 $q_{la}(X_t)$ и $q_{lb}(X_t)$ - силы магнитных полюсов магнита преобразователя,
 $X_t \in J \frac{L_s + L_t}{2}; \delta + \frac{L_s + L_t}{2} l$ - положение X_t магнита преобразователя,

$\delta = d - L_s - L_t$ - участки пути магнита преобразователя, где d - расстояние между центрами статоров,

L_s - длина магнитов (1, 1') статоров,

L_t - длина магнита (2) преобразователя.

Расстояние g в рамках раскрытия данного изобретения определено как расстояние между обращенной к статору поверхностью преобразователя и обращенной к преобразователю поверхностью статора.

Статор и преобразователь могут иметь магнитную часть или слой, окружающий магнитную часть, или распорный элемент, предотвращающий контакт магнитных частей статора и преобразователя, так что в случае данного выполнения статора и преобразователя при расстоянии $g=0$ между статором и преобразователем магнитные части статора и преобразователя, однако, не находятся в контакте.

Кроме того, расстояние g можно устанавливать с помощью управляющего устройства в зависимости от временных свойств магнитов. Временные свойства магнитов могут изменяться, с одной стороны, за счет внешних воздействий, таких как тепловая нагрузка, с другой стороны, за счет управления с помощью других управляющих устройств. Например, возможность управления напряженностью магнитного поля, а также ориентацией магнитов обеспечивается с помощью способов, известных из уровня техники. Кроме того, в соответствии с уровнем техники выбор материала, а также комбинаций материалов может также оказывать влияние на свойства магнита.

Содержащееся в магнитном устройстве согласно изобретению управляющее устройство может управлять расстоянием g с учетом указанных выше влияний и свойств магнитов по меньшей мере одного статора или по меньшей мере одного преобразователя.

В испытательной установке минимальное расстояние $g_{\min}$ составляло 1,0-2,0 мм. Испытательная установка выполнена с возможностью бесступенчатого регулирования расстояния, так что испытания проводились через каждый интервал расстояния в диапазоне от 1,0 до 2,0 мм.

Ось, вдоль которой расположены преобразователь и статор, может иметь многоугольную, изогнутую на участках зон или проходящую прямолинейно на других участках зон форму.

При также лишь кратковременном контакте или при достаточно близком сближении друг с другом статора и преобразователя они в соответствии с общепринятой концепцией действуют как один магнит, так что с целью обеспечения возможности колебательного движения его необходимо разделять с помощью дополнительной энергии отделения. Задачей данного изобретения является создание магнитного устройства, которое характеризуется тем, что статор и преобразователь при работе магнитного устройства согласно изобретению никогда не вступают в контакт друг с другом и, тем самым, с учетом общепринятой концепции во время использования магнитного устройства они никогда не действуют как один магнит. Это обеспечивает работу без использования этой дополнительной энергии отделения при движении преобразователя в направлении от статора.

Изобретение не исключает, что преобразователь и статор при не использовании магнитного устройства согласно изобретению находятся в контакте друг с другом.

Магнитное устройство, выполненное в качестве магнитного привода, может быть соединено с подлежащей приведению в движение во время работы магнитного привода маховой массой, которая компенсирует различные ускорения преобразователя на участке пути движения преобразователя. В качестве примера в данном случае можно привести маховое колесо согласно уровню техники.

Магнитное устройство согласно изобретению содержит по меньшей мере один статор и один подвижный относительно статора транслятор. Вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению с высоким коэффициентом полезного действия содержит два статора и один установленный с возможностью движения между статорами транслятор. Для последовательного расположения приводов магнитный привод согласно изобретению может содержать множество $n=1, 2, 3, \dots$ статоров и $n-1$ подвижно установленных между статорами преобразователей.

В одном возможном варианте выполнения магнитного устройства согласно изобретению может быть предусмотрено, что по меньшей мере один статор, предпочтительно два статора, установлены, например, в средней точке оси, и по меньшей мере один транслятор, предпочтительно два преобразователя, расположены на оси по обе стороны статора.

Магнитное устройство согласно изобретению можно комбинировать с другим магнитным устройством согласно изобретению и/или с магнитным устройством согласно уровню техники.

Движение преобразователя относительно статора может быть колебательным движением.

Колебательное движение преобразователя происходит всегда относительно статора. Движение преобразователя может возникать за счет использования силы притяжения и силы отталкивания, вызванных магнитным диполем, действующим между статором и преобразователем.

Применение магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода может отличаться тем, что преобразователь совершает колебательное движение.

Кроме того, колебательное движение преобразователя может осуществляться с помощью механиче-

ской принудительной системы. За счет соединения преобразователя с механической принудительной системой, такой как, например, кривошипный механизм, можно ограничивать амплитуду колебательного движения преобразователя.

Механическая принудительная система может компенсировать различные или одинаковые напряженности магнитного поля и их влияние на движение преобразователя. Изобретение, описание которого приводится ниже, основывается на испытаниях с помощью испытательной установки, которая работает с магнитами различной напряженности поля или с магнитами одинаковой напряженности поля. Хорошие результаты можно достичь при работе испытательной установки с помощью магнитов одинаковой напряженности поля.

Механическая принудительная система может вынуждать дальнейшее движение преобразователя в конечное положение и тем самым высвобождать преобразователь из магнитного поля наиболее близко расположенного статора против действующих между статором и преобразователем сил притяжения, а также действующих между статором и преобразователем сил отталкивания.

При использовании магнитного устройства согласно изобретению в качестве резистивного элемента преобразователь останавливается на заданном расстоянии в течение заданного промежутка времени.

Ниже рассматривается возникновение магнитной поляризации или намагничивания материала на основе магнитного поля H , которое вызывает дополнительное магнитное поле J . Кроме того, выводится то расстояние преобразователя до статора в конечном положении движения преобразователя, в котором сила притяжения, соответственно, сила отталкивания между статором и преобразователем является максимальной.

Принятые в последующем упрощения не должны ни в коем случае ограничивать объем правовой защиты, а выполнены в данном случае исключительно лишь для лучшего понимания обсуждаемой проблемы.

В последующем рассматривается магнитный привод, который содержит два расположенных на одной оси статора и один установленный с возможностью движения между статорами вдоль оси преобразователя. Статоры и преобразователь могут быть выполнены в виде ротационно-симметричных вокруг этой оси тел.

При магнитном возбуждении с помощью поля H намагничивается ферромагнитный сердечник и вызывает дополнительное магнитное поле M . Магнитные поля M и H образуют магнитное поле B , при этом все магнитные поля сведены друг с другом в одном уравнении.

Магнитное поле, намагничивание и магнитную индукцию можно выразить в общем виде с помощью уравнения 1

$$B = \mu_0 H + J$$

уравнение 1

При этом для J справедливо

$$J = \mu_0 M$$

уравнение 2

Из уравнения 1 и уравнения 2 следует

$$B = \mu_0 (H + M)$$

уравнение 3

Объемная магнитная восприимчивость задана следующим соотношением:

$$M = \chi_v \times H$$

уравнение 4

Из чего получается магнитная индукция в виде произведения намагничивания и напряженности магнитного поля

$$B = \mu_0 H + J = \mu_0 (1 + \chi_v) H$$

уравнение 5

или

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

уравнение 6

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м (Генри на метр) - магнитная проницаемость пространства,

χ_v - объемная магнитная восприимчивость материала,

$\mu_r = 1 + \chi_v$ - относительная магнитная проницаемость материала,

$\mu = \mu_0 \times \mu_r$ - абсолютная магнитная проницаемость материала,

B - магнитная индукция, Тл,

H - магнитное поле в амперах на метр (А/м),

J - намагничивание, Тл,

M - магнитный дипольный момент на единицу объема в амперах на метр (А/м).

В последующем рассматривается цилиндрическая слоистая катушка с магнитным сердечником, при этом цилиндрическая геометрия приводит к упрощению в соответствии с законом Био-Савара.

При O в качестве центра цилиндрической катушки и (Ox) в качестве оси магнитная индукция в точ-

ке $M(x)$ на оси (Ох) равна

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{B}(x)_{Ox} = \pm \|\vec{B}(x)_{Ox}\| \vec{e}_{Ox} \\ \|\vec{B}(x)_{Ox}\| = \mu \frac{NI}{4a} \left\{ \frac{(x+a)}{\sqrt{R^2 + (x+a)^2}} - \frac{(x-a)}{\sqrt{R^2 + (x-a)^2}} \right\} \end{array} \right\}$$

уравнение 7

где $\vec{e}_{Ox}$ - единичный вектор оси (Ох),

μ - абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника,

N - количество полных витков,

$L=2a$ - длина катушки, м,

R - внутренний радиус катушки, м,

I - сила тока внутри катушки, А.

На концах ($x=-a$ и $x=+a$) магнитных полюсов напряженность поля индукции в соответствии с законом Тесла составляет

$$B_0 = \|\vec{B}(x = \pm a)_{Ox}\| = \frac{\mu NI}{2\sqrt{R^2 + (2a)^2}}$$

уравнение 8

Из уравнения 6 выводится напряженность магнитного поля на концах электромагнитных полюсов в амперах на метр (А/м)

$$H_0 = \|\vec{H}_M(x = \pm a)_{Ox}\| = \frac{NI}{2\sqrt{R^2 + (2a)^2}}$$

уравнение 9

При этом из уравнения 4 и 6 получается момент магнитного диполя в А/м

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{M}_0 = \pm \|\vec{M}_0\| \vec{e}_{Ox} \\ \|\vec{M}_0\| = \pm \chi_v \frac{B_0}{\mu} \vec{e}_{Ox} = \pm \frac{\chi_v NI}{2\sqrt{R^2 + L^2}} \vec{e}_{Ox} \end{array} \right\}$$

уравнение 10

Наконец, момент магнитного двухполюсника можно выразить как

$$\vec{m} = \vec{M}_0 V = \pm \frac{\chi_v NI \pi R^2 L}{2\sqrt{R^2 + L^2}} \vec{e}_{Ox}$$

уравнение 11

где, как известно, $V=\pi R^2 L$ является объемом электромагнитного сердечника.

В соответствии с известной моделью Гильберта магнитные диполи соответствуют двум магнитным зарядам $+q_m$ и $-q_m$, при этом диполи находятся на расстоянии L друг от друга. Положительный магнитный заряд является северным полюсом, отрицательный магнитный заряд - южным полюсом.

Момент магнитного диполя ориентирован от северного полюса к южному полюсу.

$$\vec{m} = \pm q_m L \vec{e}_{Ox}$$

уравнение 12

где q_m - величина магнитных полюсов электромагнита, А/м,

L - расстояние между магнитными полюсами, м.

Из комбинации уравнений 11 и 12 получается

$$q_m = \frac{\|\vec{M}_0\| V}{L} = \frac{\chi_v NI \pi R^2}{2\sqrt{R^2 + L^2}}$$

уравнение 13

где q_m - величина магнитных полюсов электромагнита, А/м,

χ_v - объемная восприимчивость материала,

N - количество полных витков,

$L=2a$ - длина катушки, м,

R - внутренний радиус катушки, м,

I - сила тока внутри катушки, А.

В последующем рассматривается вариант выполнения магнитного привода согласно изобретению, содержащего три выровненных на одной оси электромагнита, при этом первый и второй электромагниты установлены неподвижно и обозначаются в последующем статорами. Статоры расположены на одной оси на расстоянии d друг от друга. Статоры в рамках данного раскрытия достаточно характеризуются

следующими параметрами:

- N_s - количество полных витков катушки статора,
- L_s - длина статора, м,
- R_s - радиус катушки статора, м,
- I_s - сила тока внутри катушки статора, А,
- χ_v - объемная магнитная восприимчивость ферромагнитного сердечника статора,
- $d = \|\vec{O}_2\|$ - расстояние между обоими статорами.

Третий магнит расположен подвижно на заданной двумя статорами оси и между двумя статорами. Третий магнит обозначается в последующем преобразователем и достаточно определен с помощью следующих параметров:

- N_t - количество полных витков катушки преобразователя,
- L_t - длина преобразователя, м,
- R_t - радиус катушки преобразователя, м,
- I_{st} - сила тока внутри катушки преобразователя, А,
- χ_{vt} - объемная магнитная восприимчивость ферромагнитного сердечника преобразователя,
- $\delta = d - L_s - L_t$ - участок пути, по которому проходит преобразователь при движении между статорами.

Статоры электрически соединены с источником постоянного тока $+I_s$ и $-I_s$, за счет чего сила магнитных полюсов по модулю в абсолютных значениях является одинаковой, однако образующиеся индукционные поля направлены в противоположных направлениях.

Полярность статоров и преобразователя следует выбирать, как показано на фиг. 1 и 2, с целью обеспечения движения преобразователя за счет силы отталкивания и силы притяжения, которые описываются с помощью получаемой из них результирующей схемой действия сил.

Ниже вычисляется результирующая схема действия сил, которая получается при выборе полярности статора и преобразователя в соответствии с фиг. 1. Показанная на фиг. 1 полярность преобразователя обозначается также "отрицательной" поляризацией преобразователя, т.е. магнитный дипольный момент $\vec{m}_t$ ориентирован в направлении $-\vec{e}_{OX}$.

С применением уравнения 11 получается

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{m}_{s1} &= + \frac{\chi_{vs} N_s I_s \pi R_s^2 L_s}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \vec{e}_{OX} \\ \vec{m}_{s2} &= - \frac{\chi_{vs} N_s I_s \pi R_s^2 L_s}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \vec{e}_{OX} \\ \vec{m}_t &= - \frac{\chi_{vt} N_t I_t \pi R_t^2 L_t}{2\sqrt{(R_t^2 + L_t^2)}} \vec{e}_{OX} \end{aligned} \right\}$$

уравнение 14

и

$$\left\{ \begin{aligned} q_{s1} &= \frac{\chi_{vs} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_{s2} &= \frac{\chi_{vs} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_t &= \frac{\chi_{vt} N_t I_t \pi R_t^2}{2\sqrt{(R_t^2 + L_t^2)}} \end{aligned} \right\}$$

уравнение 15

Со ссылкой на модель Гильберта принимается, что возникающие между магнитами магнитные силы возникают вследствие происходящего взаимодействия магнитных зарядов вблизи полюсов магнитных диполей.

Силы взаимодействия между магнитными полюсами определяются уравнением 16

$$\vec{F} = \mu_0 \frac{q_a q_b}{4\pi r^2} \vec{e}_{OX}$$

уравнение 16

где q_i - сила магнитного полюса,

r - расстояние между магнитными полюсами.

Происходящее взаимодействие между статорами и преобразователем вызывает результирующую

схему действия сил, которая действует на транслятор. Эта результирующая схема действия сил имеет одинаковое с осью (Ох) направление и направлена в направлении $\vec{e}_{ox}$ (на фиг. 1 слева направо).

С учетом $\delta=r_1+r_2=d-L_s-L_t$ для расстояния движения преобразователя между статорами получается

$$\begin{cases} r_1 = X_t - \frac{L_s + L_t}{2} \\ r_2 = \delta + \frac{L_s + L_t}{2} - X_t \end{cases}$$

где $X_t \in \left[\frac{L_s + L_t}{2}; \frac{L_s + L_t}{2} + \delta \right]$ - положение средней точки преобразователя на оси (Ох).

С применением известной модели Гильберта можно вычислять результирующую схему действия сил посредством следующего суммирования восьми взаимодействий между магнитными полюсами.

При $-q_{s1} \leftrightarrow +q_t$ для взаимодействия сил притяжения между левым статором и преобразователем при расстоянии L_s+r_1 справедливо

$$\begin{cases} \vec{F}_{slata}(r_1) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{(L_s + r_1)^2} \vec{e}_{ox} \\ \vec{F}_{slata}(X_t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{\left(X_t + \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} \vec{e}_{ox} \end{cases}$$

при $-q_{s1} \leftrightarrow -q_t$ взаимодействие сил отталкивания при расстоянии L_s+r_1

$$\begin{cases} \vec{F}_{slatb}(r_1) = +\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{(r_1 + L_s + L_t)^2} \vec{e}_{ox} \\ \vec{F}_{slatb}(X_t) = +\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{\left(X_t + \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \vec{e}_{ox} \end{cases}$$

при $+q_{s1} \leftrightarrow +q_t$ взаимодействие сил отталкивания при расстоянии r_1

$$\begin{cases} \vec{F}_{slbta}(r_1) = +\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{r_1^2} \vec{e}_{ox} \\ \vec{F}_{slbta}(X_t) = +\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{\left(X_t - \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \vec{e}_{ox} \end{cases}$$

при $+q_{s1} \leftrightarrow -q_t$ силы притяжения при расстоянии r_1+L_t

$$\begin{cases} \vec{F}_{slbtb}(r_1) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{(r_1 + L_t)^2} \vec{e}_{ox} \\ \vec{F}_{slbtb}(X_t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s1}q_t}{\left(X_t + \frac{L_t - L_s}{2}\right)^2} \vec{e}_{ox} \end{cases}$$

при $+q_{s2} \leftrightarrow +q_t$ для взаимодействия сил отталкивания при расстоянии между правым статором и преобразователем L_t+r_2 справедливо

$$\begin{cases} \vec{F}_{s2ata}(r_2) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{(r_2 + L_t)^2} \vec{e}_{ox} \\ \vec{F}_{s2ata}(X_t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{\left(\delta + \frac{L_s}{2} + \frac{3L_t}{2} - X_t\right)^2} \vec{e}_{ox} \end{cases}$$

силы притяжения при расстоянии r_2

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_{s2atb}(r_2) = + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{r_2^2} \vec{e}_{OX} \\ \bar{F}_{s2atb}(X_t) = + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{\left(\delta + \frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \vec{e}_{OX} \end{array} \right\}$$

-q_{s2} ↔ +q_t притяжения при расстоянии L_s+r₂+L_t

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_{s2bta}(r_2) = + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{(r_2 + L_s + L_t)^2} \vec{e}_{OX} \\ \bar{F}_{s2bta}(X_t) = + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{\left(\delta + 3\frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \vec{e}_{OX} \end{array} \right\}$$

силы отталкивания при расстоянии r₂+L_s

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_{s2btb}(r_2) = - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{(r_2 + L_s)^2} \vec{e}_{OX} \\ \bar{F}_{s2btb}(X_t) = - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{s2}q_t}{\left(\delta + \frac{3L_s}{2} + \frac{L_t}{2} - X_t\right)^2} \vec{e}_{OX} \end{array} \right\}$$

Действующая на преобразователь результирующая схема действия сил является векторной суммой всех взаимодействий

$$\bar{F}_{TOT}(X_t) = \sum_{\substack{i=a,b \\ j=a,b}} \bar{F}_{s1ij}(X_t) + \sum_{\substack{i=a,b \\ j=a,b}} \bar{F}_{s2ij}(X_t)$$

$$\bar{F}_{TOT}(X_t) = \frac{\mu_0 q_t}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{q_{s1}}{\left(X_t + \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \\ + \frac{q_{s1}}{\left(X_t - \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \\ + \frac{q_{s2}}{\left(\delta + \frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \\ + \frac{q_{s2}}{\left(\delta + 3\frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} + \frac{q_{s1}}{\left(X_t + \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} \\ + \frac{q_{s1}}{\left(X_t + \frac{L_t - L_s}{2}\right)^2} \\ + \frac{q_{s2}}{\left(\delta + \frac{L_s}{2} + \frac{3L_t}{2} - X_t\right)^2} \\ + \frac{q_{s2}}{\left(\delta + \frac{3L_s}{2} + \frac{L_t}{2} - X_t\right)^2} \end{array} \right\} \vec{e}_{OX}$$

уравнение 17

где $X_t \in \left[\frac{L_s + L_t}{2}; \delta + \frac{L_s + L_t}{2}\right]$ - положение преобразователя,
 $\delta = d - L_s - L_t$ - участок пути преобразователя

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{s1} = \frac{\chi_{V3} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_{s2} = \frac{\chi_{V5} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_t = \frac{\chi_{V1} N_t I_t \pi R_t^2}{2\sqrt{(R_t^2 + L_t^2)}} \end{array} \right\}$$

Далее вычисляется результирующая схема действия сил, которая получается при выборе полярности статоров и преобразователя в соответствии с фиг. 2. Показанные на фиг. 2 полярности преобразователя обозначаются также "положительной" полярностью преобразователя, т.е. магнитный дипольный момент $\vec{m}_t$ ориентирован в направлении $\vec{e}_{OX}$.

Из уравнений 14 и 15 получается уравнение 19

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{m}_{s1} &= + \frac{\chi_{Vs} N_s I_s \pi R_s^2 L_s}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \vec{e}_{OX} \\ \vec{m}_{s2} &= + \frac{\chi_{Vs} N_s I_s \pi R_s^2 L_s}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \vec{e}_{OX} \\ \vec{m}_t &= - \frac{\chi_{Vt} N_t I_t \pi R_t^2 L_t}{2\sqrt{(R_t^2 + L_t^2)}} \vec{e}_{OX} \end{aligned} \right\}$$

уравнение 18

и

$$\left\{ \begin{aligned} q_{s1} &= \frac{\chi_{Vs} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_{s2} &= \frac{\chi_{Vs} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_t &= \frac{\chi_{Vt} N_t I_t \pi R_t^2}{2\sqrt{(R_t^2 + L_t^2)}} \end{aligned} \right\}$$

уравнение 19

При $\vec{F}_{xxx}(X_t)$ в качестве силы, вызываемой взаимодействием между статорами и преобразователем, при поляризации преобразователя согласно фиг. 1 и $\vec{F}_{xxx}(X_t)$ в качестве аналогичной силы при поляризации преобразователя согласно фиг. 2, получаются следующие соотношения для взаимодействия между полюсами:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{F}_{s1ata}(X_t) &= -\vec{F}_{s1ata}(X_t) \\ \vec{F}_{s1atb}(X_t) &= -\vec{F}_{s1atb}(X_t) \\ \vec{F}_{s1bta}(X_t) &= -\vec{F}_{s1bta}(X_t) \\ \vec{F}_{s1btb}(X_t) &= -\vec{F}_{s1btb}(X_t) \end{aligned} \right\} \text{ и}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{F}_{s2ata}(X_t) &= -\vec{F}_{s2ata}(X_t) \\ \vec{F}_{s2atb}(X_t) &= -\vec{F}_{s2atb}(X_t) \\ \vec{F}_{s2bta}(X_t) &= -\vec{F}_{s2bta}(X_t) \\ \vec{F}_{s2btb}(X_t) &= -\vec{F}_{s2btb}(X_t) \end{aligned} \right\},$$

откуда следует

$$\vec{F}_{TOT}(X_t) = \sum_{\substack{i=a,b \\ j=a,b}} \vec{F}_{s1ij}(X_t) + \sum_{\substack{i=a,b \\ j=a,b}} \vec{F}_{s2ij}(X_t) = - \left\{ \sum_{\substack{i=a,b \\ j=a,b}} \vec{F}_{s1ij}(X_t) + \sum_{\substack{i=a,b \\ j=a,b}} \vec{F}_{s2ij}(X_t) \right\} = - \{ \vec{F}_{TOT}(X_t) \}$$

Для показанных на фиг. 1 условий с учетом, что

 N_x - количество витков катушки преобразователя, соответственно статора, L_x - длина статора, соответственно преобразователя, м, R_x - радиус статора, соответственно преобразователя, м, I_x - сила тока внутри катушки преобразователя, соответственно статора, А, χ_{Vx} - объемная магнитная восприимчивость ферромагнитного сердечника статора, соответственно

преобразователя, и статор #1 поляризован так, что $\vec{m}_{s1} = -\|\vec{m}_{s1}\| \vec{e}_{OX}$, и статор #2 поляризован так, что $\vec{m}_{s2} = +\|\vec{m}_{s2}\| \vec{e}_{OX}$ справедливо

$$\bar{F}_{TOT}(X_t) = \frac{\mu_0 q_t}{4\pi} \left\{ \left[\begin{aligned} &\frac{q_{s1}}{\left(X_t + \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \\ &+ \frac{q_{s1}}{\left(X_t - \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \\ &+ \frac{q_{s2}}{\left(\delta + \frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \\ &+ \frac{q_{s2}}{\left(\delta + 3\frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \end{aligned} \right] - \left[\begin{aligned} &+ \frac{q_{s1}}{\left(X_t + \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} \\ &+ \frac{q_{s1}}{\left(X_t + \frac{L_t - L_s}{2}\right)^2} \\ &+ \frac{q_{s2}}{\left(\delta + \frac{L_s}{2} + \frac{3L_t}{2} - X_t\right)^2} \\ &+ \frac{q_{s2}}{\left(\delta + \frac{3L_s}{2} + \frac{L_t}{2} - X_t\right)^2} \end{aligned} \right] \right\} \bar{p}_{translator}$$

уравнение 20

где $\bar{p}_{translator} = \pm \vec{e}_{OX}$ - направление магнитного дипольного момента ($\vec{m}_t = \|\vec{m}_t\| \bar{p}_{translator}$) преобразователя; это направление задано направлением напряжения переменного тока I_t внутри преобразователя,

$$\left\{ \begin{aligned} q_{s1} &= \frac{\chi_{v_s} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_{s2} &= \frac{\chi_{v_s} N_s I_s \pi R_s^2}{2\sqrt{(R_s^2 + L_s^2)}} \\ q_t &= \frac{\chi_{v_t} N_t I_t \pi R_t^2}{2\sqrt{(R_t^2 + L_t^2)}} \end{aligned} \right\} - \text{силы магнитных полюсов,}$$

$$X_t \in \left[\frac{L_s + L_t}{2}; \delta + \frac{L_s + L_t}{2} \right] - \text{положение преобразователя,}$$

$\delta = d - L_s - L_t$ - участок пути преобразователя,

$d = \|\vec{OO}_2\|$ - заданное расстояние между статорами.

При одинаковой длине электромагнитов $L_s = L_t = L$, уравнение 20 может быть упрощено следующим образом:

$$\bar{F}_{TOT}(X_t) = \frac{\mu_0 q_t}{4\pi} \left\{ \left[\begin{aligned} &\frac{q_{s1}}{(X_t + L)^2} \\ &+ \frac{q_{s1}}{(X_t - L)^2} \\ &+ \frac{q_{s2}}{(\delta + L - X_t)^2} \\ &+ \frac{q_{s2}}{(\delta + 3L - X_t)^2} \end{aligned} \right] - \left[\begin{aligned} &+ \frac{2q_{s1}}{X_t^2} \\ &+ \frac{2q_{s2}}{(\delta + 2L - X_t)^2} \end{aligned} \right] \right\} \bar{p}_{translator}$$

уравнение 21

Последующие выкладки основаны на принятом упрощении, что силы полюсов магнитов являются неизменными, хотя в реальности при движении преобразователя между статорами образуется магнитное поле индукции (Ox).

При этом справедливо уравнение 22

$$\vec{B}_{TOT}(X_t, x)_{Ox} = \vec{B}_{s1}(x)_{Ox} + \vec{B}_{s2}(x)_{Ox} + \vec{B}_t(X_t, x)_{Ox}$$

уравнение 22

где $\vec{B}_{TOT}(X_t, x)_{Ox}$ - полное индукционное поле на оси (Ox) в положении x , когда преобразователь достиг положения X_t ,

$\vec{B}_{s1}(x)_{Ox}$ - индукционное поле первого статора на оси (Ox) в положении x ,

$\vec{B}_{s2}(x)_{Ox}$ - индукционное поле второго статора на оси (Ox) в положении x ,

$\vec{B}_t(X_t, x)_{Ox}$ - индукционное поле преобразователя на оси (Ox) в положении X_t .

Величина магнитного индукционного поля уже задана уравнением 7, откуда можно вывести вели-

чину магнитного индукционного поля между первым статором и преобразователем.

$$\begin{aligned}\|\bar{B}_{s1}(x)_{Ox}\| &= \mu_{s1} \frac{N_{s1} I_{s1}}{4a_{s1}} \left\{ \frac{(x+a_{s1})}{\sqrt{(R_{s1}^2 + (x+a_{s1})^2)}} - \frac{(x-a_{s1})}{\sqrt{(R_{s1}^2 + (x-a_{s1})^2)}} \right\} \\ \|\bar{B}_{s2}(x')_{O2x}\| &= \mu_{s2} \frac{N_{s2} I_{s2}}{4a_{s2}} \left\{ \frac{(x'+a_{s2})}{\sqrt{(R_{s2}^2 + (x'+a_{s2})^2)}} - \frac{(x'-a_{s2})}{\sqrt{(R_{s2}^2 + (x'-a_{s2})^2)}} \right\} \\ \|\bar{B}_t(x'')_{Tx}\| &= \mu_t \frac{N_t I_t}{4a_t} \left\{ \frac{(x''+a_t)}{\sqrt{(R_t^2 + (x''+a_t)^2)}} - \frac{(x''-a_t)}{\sqrt{(R_t^2 + (x''-a_t)^2)}} \right\}\end{aligned}$$

уравнение 23

где x - положение на оси (Ox), относительно которого вычисляется $\|\bar{B}_{s1}(x)_{Ox}\|$,

x' - положение на оси (Ox), относительно которого вычисляется $\|\bar{B}_{s2}(x')_{O2x}\|$,

x'' - положение (T_x) на оси (Ox), относительно которого вычисляется $\|\bar{B}_t(x'')_{Tx}\|$.

При $\begin{cases} \vec{0}_2 M = \vec{0}_2 0 + \vec{0} M \\ \vec{T} M = \vec{T} 0 + \vec{0} M \end{cases}$ можно выразить $\|\bar{B}_{s2}(x)_{Ox}\|$ и $\|\bar{B}_t(x)_{Ox}\|$ с применением $\begin{cases} x' = x - d \\ x'' = x - X_t \end{cases}$ в качестве изменений переменных

$$\begin{aligned}\|\bar{B}_{s1}(x)_{Ox}\| &= \mu_{s1} \frac{N_{s1} I_{s1}}{4a_{s1}} \left\{ \frac{(x+a_{s1})}{\sqrt{(R_{s1}^2 + (x+a_{s1})^2)}} - \frac{(x-a_{s1})}{\sqrt{(R_{s1}^2 + (x-a_{s1})^2)}} \right\} \\ \|\bar{B}_{s2}(x)_{Ox}\| &= \mu_{s2} \frac{N_{s2} I_{s2}}{4a_{s2}} \left\{ \frac{(x-d+a_{s2})}{\sqrt{(R_{s2}^2 + (x-d+a_{s2})^2)}} - \frac{(x-d-a_{s2})}{\sqrt{(R_{s2}^2 + (x-d-a_{s2})^2)}} \right\} \\ \|\bar{B}_t(X_t, x)_{Ox}\| &= \mu_t \frac{N_t I_t}{4a_t} \left\{ \frac{(x-X_t+a_t)}{\sqrt{(R_t^2 + (x-X_t+a_t)^2)}} - \frac{(x-X_t-a_t)}{\sqrt{(R_t^2 + (x-X_t-a_t)^2)}} \right\}\end{aligned}$$

уравнение 24

На оси (Ox) индукционное поле ориентировано в том же направлении, что и магнитный дипольный момент. С учетом того, что

$$\bar{B}_{TOT}(X_t, x)_{Ox} = \|\bar{B}_{s1}(x)_{Ox}\| - \|\bar{B}_{s2}(x)_{Ox}\| \vec{e}_{Ox} + \|\bar{B}_t(X_t, x)_{Ox}\| \vec{p}_t$$

уравнение 25

где $\vec{e}_{Ox}$ - единичный вектор направления оси (Ox),

$\vec{p}_{translator} = \pm \vec{e}_{Ox}$ - направление магнитного дипольного момента преобразователя, получается ($\vec{m}_t = \|\vec{m}_t\| \vec{p}_{translator}$)

Направление задано направлением переменного напряжения I_t внутри преобразователя. При совместном рассмотрении уравнений 4, 6 и 11 получается

$$q_m = \frac{\|\vec{M}\| V}{L} = \|\vec{M}\| \pi R^2 = \frac{\chi_v}{\mu} \pi R^2 \|\vec{B}\| = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \pi R^2 \|\vec{B}\|$$

уравнение 26

Поскольку справедливо для статора #1

$$\begin{cases} q_{s1a}(X_t) = \frac{\mu_{Rs} - 1}{\mu_0 \mu_{Rs}} \pi R_s^2 \|\bar{B}_{TOT}(X_t, x = -a_s)\| \\ q_{s1b}(X_t) = \frac{\mu_{Rs} - 1}{\mu_0 \mu_{Rs}} \pi R_s^2 \|\bar{B}_{TOT}(X_t, x = +a_s)\| \end{cases}$$

уравнение 27

для статора #2

$$\begin{cases} q_{s2a}(X_t) = \frac{\mu_{Rs} - 1}{\mu_0 \mu_{Rs}} \pi R_s^2 \|\bar{B}_{TOT}(X_t, x = d - a_s)\| \\ q_{s2b}(X_t) = \frac{\mu_{Rs} - 1}{\mu_0 \mu_{Rs}} \pi R_s^2 \|\bar{B}_{TOT}(X_t, x = d + a_s)\| \end{cases}$$

уравнение 28

для преобразователя

$$\begin{cases} q_{ia}(X_t) = \frac{\mu_{Rt} - 1}{\mu_0 \mu_{Rt}} \pi R_t^2 \|\vec{B}_{TOT}(X_t, x = X_t - a_t)\| \\ q_{ib}(X_t) = \frac{\mu_{Rt} - 1}{\mu_0 \mu_{Rt}} \pi R_t^2 \|\vec{B}_{TOT}(X_t, x = X_t - a_t)\| \end{cases}$$

уравнение 29

то уравнение 20 принимает вид

$$\vec{F}_{TOT}(X_t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{q_{sla}(X_t)q_{tb}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} + \frac{q_{slb}(X_t)q_{ia}(X_t)}{\left(X_t - \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} + \frac{q_{s2a}(X_t)q_{ib}(X_t)}{\left(\delta + \frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} + \frac{q_{s2b}(X_t)q_{ia}(X_t)}{\left(\delta + 3\frac{L_s + L_t}{2} - X_t\right)^2} \right] \\ & - \left[\frac{q_{sla}(X_t)q_{ia}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} + \frac{q_{slb}(X_t)q_{ib}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_t - L_s}{2}\right)^2} + \frac{q_{s2a}(X_t)q_{ia}(X_t)}{\left(\delta + \frac{L_s}{2} + \frac{3L_t}{2} - X_t\right)^2} + \frac{q_{s2b}(X_t)q_{ib}(X_t)}{\left(\delta + \frac{3L_s}{2} + \frac{L_t}{2} - X_t\right)^2} \right] \end{aligned} \right\} \vec{p}_{translator}$$

уравнение 30

где $X_t \in \left[\frac{L_s + L_t}{2}; \delta + \frac{L_s + L_t}{2} \right]$ - положение преобразователя,

$\delta = d - L_s - L_t$ - участок пути движения преобразователя,

$d = \|\vec{OO}_2\|$ - расстояние между центрами статоров.

Силы магнитных полюсов вычисляются с применением уравнений 27 для первого статора, уравнения 28 для второго статора и уравнения 29 для преобразователя. Вычисление сил магнитных полюсов включает вычисление полного магнитного индукционного поля на полюсах. Это осуществляется с применением уравнения 24 и уравнения 25.

Уравнение 30 является функцией зависимости положения преобразователя между полюсами. Действующая на преобразователь результирующая схема действия сил складывается из действующей между первым статором и преобразователем силы отталкивания и действующей между вторым статором и преобразователем силы притяжения. Зависимость соответствующих сил показана на фиг. 3а, 3б, 3с.

Кроме того, из приведенных выше математических выкладок следует, что при одном положении преобразователя относительно статора сила притяжения и при изменении полярности статора или преобразователя сила отталкивания имеет различную величину.

Магнитное устройство согласно изобретению основывается на том, что за счет полярности статора или преобразователя создается результирующая схема действия сил, которая действует на преобразователь и вызывает его движение.

В одном варианте выполнения магнитного устройства согласно изобретению может быть предусмотрено, что статор выполнен в виде постоянного магнита, а преобразователь - в виде электромагнита.

Этот вариант выполнения при применении магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода имеет тот недостаток, что кабель, соединяющий преобразователь с системой электроснабжения, подвергается перемещению, по меньшей мере, на участках зон вследствие соединения с преобразователем. Однако при применении $n=1, 2, 3, \dots$ статоров и $n-1$ расположенных между статорами преобразователей выполнение преобразователей в виде электромагнитов приводит к тому, что $n-1$ преобразователей меняют полярность на меньшую, чем n статоров.

В другом варианте выполнения магнитного устройства согласно изобретению может быть предусмотрено, что статор выполнен в виде электромагнита, а преобразователь - в виде постоянного магнита.

Этот вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению при применении в качестве магнитного привода характеризуется тем, что статор в виде неподвижного магнита соединен с системой электроснабжения. Это имеет то преимущество, что кабель, соединяющий систему электроснабжения и статор, не приводится в движение. Однако при применении $n=1, 2, 3, \dots$ статоров и $n-1$ расположенных между статорами преобразователей, выполнение статоров в виде электромагнитов приводит к тому, что n статоров меняют полярность на большую, чем $n-1$ преобразователей.

Статоры и преобразователи могут быть выполнены в виде электромагнитов или в виде постоянных магнитов.

Выполнение по меньшей мере одного статора и преобразователя в виде постоянного магнита отно-

сится к случаю применения резистивного элемента. При этом движение статора ограничивается за счет активации сил отталкивания между одинаковыми полюсами статора и преобразователя.

В одном варианте выполнения магнитного устройства согласно изобретению может быть предусмотрено, что статор состоит из нескольких отдельных магнитов статора и/или преобразователь состоит из нескольких отдельных магнитов преобразователя.

Предпочтительно отдельные магниты расположены так, что за счет наложения друг на друга отдельных магнитных полей создается большая сила притяжения, соответственно сила отталкивания, которая действует между статорами и преобразователем.

Управляющее устройство может содержать распорный элемент, расположенный между статором и преобразователем, и/или механическую принудительную систему, ограничивающую движение преобразователя.

Распорный элемент может содержать переключатель, с помощью которого вызывается изменение полярности статора и/или преобразователя и/или изменение силы полюсов статора или преобразователя.

Управляющее устройство может содержать устройство измерения расстояния и/или устройство измерения времени, с помощью которого управляющее устройство в зависимости от положения преобразователя относительно статора и/или в зависимости от периода времени может изменять поляризацию статора и/или преобразователя и/или напряженность поля статора и/или преобразователя.

В одном варианте выполнения магнитное устройство согласно изобретению содержит по меньшей мере один управляющий блок, который управляет положением преобразователя относительно статора. Управляющее устройство соединено с устройством измерения положения, которое измеряет положение преобразователя относительно статора с помощью способов измерения, в частности способов измерения расстояния и способов измерения положения согласно уровню техники и возможно с учетом положения преобразователя относительно статора устанавливает полярность статора или преобразователя.

Управляющее устройство никоим образом не ограничивается измерением определенного положения преобразователя или констатацией достижения определенного положения преобразователем. Управляющее устройство может содержать другие устройства, такие как, например, средства измерения положения или средства измерения скорости для измерения положения преобразователя или скорости преобразователя в любом положении преобразователя.

Измерение положения или скорости преобразователя в любом положении может быть предпочтительным в отношении управления движением преобразователя в положении с определенным расстоянием до статора, в частности, при высокой скорости преобразователя, тем более что необходимо обеспечить торможение и ускорение преобразователя в определенном положении с определенным расстоянием до статора.

Определение положения преобразователя не ограничивается лишь измерением положения преобразователя относительно статора. Определение положения преобразователя можно выполнять относительно любой опорной точки.

Другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению характеризуется тем, что преобразователь соединен с механической принудительной системой, такой как, например, коленчатый вал, при этом с помощью этой принудительной системы осуществляется управление движением преобразователя, точнее, максимальными амплитудами движения преобразователя с сохранением расстояния от преобразователя до статора. Механическая принудительная система может быть соединена с подлежащим приведению в действие с помощью соединительного устройства, согласно изобретению, элементом, таким как, например, колесо, или же выполнена в виде его.

При линейном движении преобразователя возможно расположение отдельных магнитов статора на статоре и/или отдельных магнитов преобразователя на трансляторе вдоль образующей многоугольник линии вокруг оси многоугольника, ориентированной параллельно направлению движения преобразователя.

Направление движения преобразователя и вызываемые соответствующими магнитными полями силы притяжения и силы отталкивания ориентированы параллельно друг другу.

При вращательном движении преобразователя возможно расположение отдельных магнитов статора и/или отдельных магнитов преобразователя на статоре, соответственно на трансляторе, вдоль образующей многоугольник линии вокруг оси, ориентированной параллельно направлению движения преобразователя.

Соответствующее направление движения преобразователя и вызываемые соответствующими магнитными полями силы притяжения и силы отталкивания ориентированы параллельно друг другу.

Преобразователь может быть установлен подвижно относительно статора с помощью по меньшей мере одного направляющего блока, при этом направляющая ось направляющего блока проходит через статор в зоне между двумя непосредственно соседними отдельными магнитами статора и через преобразователь в зоне между двумя непосредственно соседними отдельными магнитами преобразователя.

За счет расположения согласно изобретению направляющего блока магнитное поле соответствующих отдельных магнитов не искажается за счет наличия направляющего блока.

Объем, расположенный между статором и находящимся в положении с наибольшим расстоянием d

до статора преобразователем, может быть вакуумом.

За счет создания согласно изобретению вакуума или зоны с уменьшенным давлением воздуха уменьшается сопротивление воздуха, противодействующее движению преобразователя. Для создания вакуума магнитное устройство согласно изобретению расположено в непроницаемом для воздуха корпусе, при этом приводная ось, токоведущий кабель и так далее проходят через этот корпус.

Перечень позиций.

- 1, 1' - Статор,
- 2 - преобразователь,
- 3 - приводная ось,
- 4 - отдельные магниты статора,
- 5 - отдельные магниты преобразователя,
- 6 - направление движения преобразователя,
- 7 - направляющий блок,
- 8 - направляющая ось,
- 9 - ось,
- 10 - многоугольник,
- 11 - токоведущий кабель,
- 12 - сила притяжения,
- 13 - сила отталкивания,
- 14 - опора статора,
- 15 - опорная конструкция,
- 16 - положение статора,
- 17 - диск,
- 18 - средняя точка диска,
- 19, 19' - стержень,
- 20, 20' - магнитный привод,
- 21 - диапазон вычислений,
- 22 - сердечник,
- 23 - катушка.

На чертежах изображено

фиг. 1 и 2 - вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода 20 вместе с применяемыми в описании переменными;

фиг. 3а-3с - диаграммы величин действующих на преобразователь сил в зависимости от расстояния положения преобразователя до статоров;

фиг. 4 и 5 - другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода;

фиг. 6 - другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода, аналогичный показанному на фиг. 1 и 2 варианту выполнения;

фиг. 7 - другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода;

фиг. 8 - возможное соединение нескольких магнитных приводов с подлежащим приводу валом;

фиг. 9-11 - другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода;

фиг. 12 - другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве резистивного элемента;

фиг. 13 - вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в изометрической проекции;

фиг. 14 - вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению на виде сверху, равнозначный показанному на фиг. 13 варианту выполнения;

фиг. 15 - разрез показанного на фиг. 13 и 14 варианта выполнения магнитного устройства согласно изобретению на виде сбоку;

фиг. 16 - расположение элементов в рамках моделирования конечных элементов (FEM) показанного на фиг. 13-15 магнитного устройства;

фиг. 17 и 18 - результат моделирования FEM;

фиг. 19 и 20 - графики к моделированию FEM.

На фиг. 1 и 2 показан вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в качестве магнитного привода 20 вместе с применяемыми в описании переменными. Магнитный привод 20 содержит преобразователь 2 и расположенные по сторонам от преобразователя 2 статоры 1, 1'. Статоры 1, 1' и преобразователь 2 являются электромагнитами, которые ориентированы вдоль одной оси, а именно в показанном в качестве примера на фиг. 1 и 2 варианте выполнения, вдоль приводной оси 3 преобразователя 2. Дипольный момент статоров 1, 1' и преобразователя 2 ориентирован параллельно этой оси.

Для попеременного изменения полярности преобразователя 2 он через токоведущий кабель 11 со-

единен с не изображенным источником переменного тока, в то время как статоры 1, 1' соединены с помощью других токоведущих кабелей 11 с не изображенным источником постоянного тока.

Полярность преобразователя 2 установлена так, что обращенный к левому статору 1 полюс преобразователя 2 имеет одинаковую полярность с ближайшим полюсом левого статора 1, за счет чего возникает сила 13 отталкивания между левым статором 1 и преобразователем 2; обращенный к правому статору 1' полюс преобразователя 2 имеет разную полярность с ближайшим полюсом правого статора 1', за счет чего возникает сила 12 притяжения между правым статором 1' и преобразователем 2. Сила 12 притяжения и сила 13 отталкивания действуют на преобразователь 2, и результирующая схема действия сил вызывают движение преобразователя 2 в показанном на фиг. 1 направлении 6 движения преобразователя слева направо, при этом направление 6 движения преобразователя ориентировано к статору 1. Происходящее затем после изменения полярности преобразователя 2 движение преобразователя в направлении 6 движения преобразователя справа налево показано на фиг. 2.

При работе магнитного привода 20 преобразователь 2 всегда имеет определенное расстояние r больше нуля до статора 1. Посредством этого признака (см. отличительную часть п.1 формулы изобретения) исключается контакт преобразователя 2 со статором 1, 1' при работе магнитного привода 20 согласно изобретению. Расстояние r определено как расстояние между обращенными друг к другу концами полюсов преобразователя 2 и соответствующего статора 1, 1'.

При линейном движении преобразователя 2 в направлении 6 движения преобразователя влево, преобразователь 2 достигает положения 16. Положение 16 является конечным положением линейного движения преобразователя 2 и характеризуется тем, что преобразователь 2, с одной стороны, имеет наименьшее заданное расстояние r_2 до левого статора 1, с другой стороны, имеет наибольшее заданное расстояние r_1 до правого статора 1'. Расстояния r_1 и r_2 заданы так, что после изменения полярности преобразователя 2 для выполнения последующего, показанного на фиг. 2 движения преобразователя справа налево, действующая на преобразователь 2 сила отталкивания 13, образующаяся за счет одинаковой полярности непосредственно соседних полюсов преобразователя 2 и левого статора 1, является максимальной.

Расстояние r задается с помощью управляющего блока, который изменяет полярность преобразователя 2, выполненного в виде электромагнита. При достижении преобразователем 2 положения 16, происходит изменение полярности преобразователя 2, так что преобразователь 2 перемещается в противоположном показанному на фиг. 1 направлению движения. За счет изменения полярности статоров 1, 1', между преобразователем 2 и левым статором 1 возникают силы отталкивания, между преобразователем 2 и правым статором 1' возникают силы притяжения с заданным уровнем энергии, за счет чего достигается показанное на фиг. 2 перемещение преобразователя 2 справа налево.

Статор 1 удерживается с помощью опоры 14 статора на опорной конструкции 15.

Преобразователь 2 соединен с приводной осью 3, которая в показанном на фиг. 1 варианте выполнения служит также в качестве направляющего блока 7 преобразователя 2. Направляющая ось 8 направляющего блока 7 ориентирована параллельно направлению 6 движения преобразователя. Направляющая ось 8 проходит через статоры 1, 1' и через преобразователь 2, при этом соответствующее магнитное поле статоров 1, 1' и преобразователя 2 претерпевает искажения за счет присутствия направляющего блока 7 в соответствующих магнитных полях.

Объем, который заключен между статорами 1, 1', является вакуумом. Для этого магнитный привод 20 расположен в не изображенном корпусе.

График на фиг. 3а показывает зависимость силы 13 отталкивания между преобразователем 2 и левым статором 1 при движении преобразователя 2 согласно фиг. 1. На фиг. 3а, а также на фиг. 3б и 3с расстояние преобразователя 2 от соответствующего статора 1, 1', действующая между преобразователем 2 и статором 1, 1' сила нанесена на оси ординат. В основе показанных на фиг. 3а, 3б и 3с графиков лежат вычисления в соответствии с приведенными в тексте описания уравнениями при следующих допущениях:

$$\mu_{R_{s1}} = \mu_{R_{s2}} = \mu_{R_t} = 100,$$

$$N_{s1} = N_{s2} = N_t = 40,$$

$$R_{s1} = R_{s2} = R_t = 0,02 \text{ м},$$

$$L_{s1} = L_{s2} = L_t = 0,04 \text{ м},$$

$$I_{s1} = I_{s2} = I_t = 1 \text{ А} = 1 \text{ А},$$

движение преобразователя составляет $\delta = 0,04 \text{ м}$.

Преобразователь 2 в положении $X_t = 0,04 \text{ м}$ находился бы в контакте с левым статором 1. Характеристика изменения значения u в графике, показанном на фиг. 3а, приближается к значению 0. Максимальное значение силы 13 отталкивания возникает при расстоянии ϵ . Предпочтительно положение 16 преобразователя 2 устанавливается с помощью управляющего блока так, что нулевая точка преобразователя 2 имеет расстояние $\epsilon_{\min}$ до нулевой точки непосредственно соседнего статора 1, 1'.

На графике согласно фиг. 3б показана зависимость силы 12 притяжения от расстояния преобразователя 2 до правого статора 1' на фиг. 1. В целом справедливо, что сила 12 притяжения увеличивается с увеличением приближения преобразователя 2 к правому статору 1'.

На фиг. 3 показан график, полученный из графиков на фиг. 3а и 3б. Таким образом, на графике со-

гласно фиг. 3с показана получающаяся из характеристики изменения силы 13 отталкивания и силы 12 притяжения результирующая схема действия сил в зависимости от положения преобразователя 2 между статорами 1, 1', при этом результирующая схема действия сил рассматривается в направлении параллельно оси, применительно к фиг. 1 и 2 параллельно оси 3 движения.

На фиг. 4 и 5 показан другой, аналогичный показанному на фиг. 1 и 2 вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению в виде магнитного привода 20. В отличие от показанного на фиг. 2 варианта выполнения в показанном на фиг. 4 другом варианте выполнения полярность преобразователя 2 остается при движении преобразователя 2 одинаковой, в то время как полярность статоров 1, 1' изменяется.

На фиг. 6 показан аналогичный показанному на фиг. 4 варианту выполнения вариант выполнения, который в отличие от показанного на фиг. 4 варианта выполнения содержит два направляющих блока. Преимуществом относительно показанного на фиг. 4 варианта выполнения является то, что магнитное поле, действующее между статорами 1, 1' и преобразователем 2, не искажается за счет наличия направляющего блока 7.

На фиг. 7 показан другой вариант выполнения магнитного привода 20, при этом преобразователь выполняет вращательное движение. Магнитный привод 20 содержит четыре выполненных в виде сегментов отдельных магнита 5 преобразователя, которые расположены по кругу 10 вокруг приводной оси 3 и оси вращения преобразователя и под прямым углом к ней. Отдельные магниты 5 преобразователя механически соединены с приводной осью 3 через направляющие блоки, так что отдельные магниты 5 преобразователя образуют преобразователь 2. В зонах между отдельными магнитами 5 преобразователя расположены четыре, также имеющие форму сегментов отдельных магнита 4 статора, которые с помощью не изображенного механического соединения образуют статор 1.

В соответствии с приведенным выше описанием обращенные друг к другу полюсы отдельных магнитов 4 статора и отдельных магнитов 5 преобразователя имеют разную или одинаковую полярность.

При вращательном движении преобразователя 2 при использовании магнитного привода 20 он всегда находится на расстоянии от статора 1, при этом вращательное направление 6 движения преобразователя отдельных магнитов 5 преобразователя всегда направлено к одному из отдельных магнитов 4 статора.

На фиг. 8 показано соединение первого магнитного привода 20 согласно изобретению со вторым магнитным приводом 20' согласно изобретению. Механическое соединение магнитных приводов 20, 20' осуществляется через диск 17, который установлен с возможностью вращения вокруг средней точки 18 диска. Между диском 17 и магнитными приводами 20, 20' по геометрическим причинам предусмотрен соответствующий стержень 19, который на одном своем конце соединен с диском эксцентрично относительно средней точки 18 диска, а на своем другом конце шарнирно соединен с соответствующим магнитным приводом 20, 20'.

Магнитные приводы 20, 20' установлены стационарно относительно средней точки 18 диска, так что за счет линейного движения, создаваемого с помощью магнитных приводов 20, 20', вызывается вращательное движение диска 17. За счет эксцентричной установки стержня 19, 19' осуществляется механическое управление линейным движением преобразователя 2 (не изображен на фиг. 8) магнитного привода 20, 20'.

На фиг. 9-11 показан в различных проекциях вариант выполнения магнитного привода, который отличается расположением нескольких отдельных магнитов 4 статора на статорах 1, 1' и нескольких отдельных магнитов 5 преобразователя на трансляторе 2, а также детали преобразователя 2 и статора 1, 1'.

На фиг. 9 показан на виде сверху показанный на фиг. 9-11 вариант выполнения магнитного привода согласно изобретению. Магнитный привод содержит два статора 1, 1', которые расположены вдоль оси 9. Кроме того, предусмотрены два направляющих блока 7, с помощью которых между статорами 1, 1' установлен с возможностью движения относительно статоров 1, 1' преобразователь 2. Кроме того, преобразователь 2 соединен с приводной осью 3, которая проходит через статоры 1, 1' к подлежащему приводу элементу (не изображен). Опорная конструкция 15 служит в качестве опоры для оси 9 и приводной оси 3.

На фиг. 10 показан на виде сбоку показанный на фиг. 9-11 вариант выполнения магнитного привода согласно изобретению. Статор 1 содержит пять отдельных магнитов 4 статора, которые расположены ротационно-симметрично вокруг приводной оси 3. Отдельные магниты 4 статора расположены противоположно соответствующим отдельным магнитам 5 преобразователя.

На фиг. 11 показан на виде сбоку преобразователь 2. Преобразователь 2 содержит несколько отдельных магнитов 5 преобразователя, которые расположены ротационно-симметрично вокруг приводной оси 3, проходящей перпендикулярно плоскости рассматривания, вдоль многоугольника 10. Отдельные магниты 5 преобразователя опираются, с одной стороны, на приводную ось 3, с другой стороны, на опору 21 преобразователя с помощью подшипника 22 преобразователя. Подшипники 22 преобразователя являются перемычками, выполненными по возможности с наименьшим поперечным сечением.

На фиг. 12 показан другой вариант выполнения магнитного привода согласно изобретению в качестве резистивного элемента. Конструкция в принципе аналогична указанным выше вариантам выполнения, однако при этом статоры 1, 1' имеют относительно преобразователя 2 такую полярность, что между

полюсами преобразователя 2 и статорами 1, 1' активируются силы 12 притяжения и силы 13 отталкивания. Тем самым преобразователь 2 при ускорении за счет внешней силы, действующей через приводную ось 3 на преобразователь 2, может перемещаться между статорами 1, 1' на участке пути.

На фиг. 13 показан в изометрической проекции другой вариант выполнения магнитного устройства согласно изобретению. Магнитное устройство содержит расположенный между двумя преобразователями 2 статор 1, при этом статор 1 и преобразователь 2 расположены внутри опорной конструкции 15, выполненной в виде корпуса. Снаружи опорной конструкции 15 расположена приводная ось 3. Статор 1 и преобразователь 2 расположены вдоль оси 9, при этом ось 9 задает направление 6 движения преобразователя.

Преобразователи 2 установлены с помощью двух направляющих блоков 7 и опираются на направляющие блоки 7, при этом направляющие оси 8 ориентированы параллельно направлению 6 движения преобразователей. Направляющие оси 8 расположены по сторонам от преобразователей 2, так что направляющие оси 8 не искажают магнитное поле, действующее между преобразователями 2 и статором 1.

Направляющие оси 8 удерживаются с помощью опорной конструкции 15.

Показанное на фиг. 13 магнитное устройство имеет, по существу, указанные выше свойства, если они применимы к показанному на фиг. 13 устройству. Преобразователи 2 являются магнитами марки N45. Статор 1 является электромагнитом, содержащим магнитный сердечник 22 и катушку 23, намотанную вокруг сердечника 22.

На фиг. 14 показан на виде сверху варианту выполнения магнитного устройства, равнозначный показанному на фиг. 13 магнитному устройству согласно изобретению. Указанные выше применительно к фиг. 13 признаки, по существу, показаны на фиг. 14.

На фиг. 14 показано расположение преобразователей 2 и статора 1, а также приводной оси 3 вдоль оси 9.

Статор 1 установлен с помощью опоры 14 статора на опорной конструкции 15. Сердечник 22 статора 1 проходит в направлении оси 9 через опорную конструкцию 15 наружу, так что магнитное поле, действующее между статором 1 и преобразователями 2, не искажается опорой 14 статора.

Форма опор 24 статора, с помощью которых преобразователи установлены на направляющем блоке 7, согласована с нагрузкой от моментов, распознаваемой специалистами в данной области техники, и с силами колебаний, вызываемыми, среди прочего, колебательным движением преобразователей 2.

На фиг. 15 показан разрез показанного на фиг. 13 и 14 магнитного устройства. Дополнительно к указанным выше признакам обозначен диапазон 21 вычисления, для которого с помощью способа конечных элементов (Finite Element Methode, сокращенно FEM) вычислено прохождение линий напряженности магнитного поля. Для минимизации вычислительных затрат диапазон 21 вычисления проходит лишь по одной половине симметрии; ось симметрии на фиг. 15 совпадает с осью 9. Результаты вычисления с помощью способа FEM (см. фиг. 17 и 18) раскрываются в последующем описании.

На фиг. 16 показана в увеличенном масштабе половина симметрии, которая была подвергнута вычислению с помощью способа FEM. Ось симметрии и ось 9 снова совпадают друг с другом. На фиг. 16 показаны половины симметрии преобразователей 2.

Статор 1 содержит сердечник 22 и катушку 23, при этом снова показаны лишь соответствующие половины симметрии.

Кроме того, на фиг. 16 показано поле 21 вычислений.

На фиг. 17 и 18 показан результат моделирования с помощью способа FEM. В основе вычисления с помощью способа FEM лежит заданный критерий, что статор выполнен в виде электромагнита с силой тока 90 А, а преобразователи 2 в виде постоянных магнитов марки N45 с 1050 кА/м.

На фиг. 17 показано положение преобразователя 2 на расстоянии $r=1,0$ мм до статора. Хотя действующая между статором 1 и преобразователем 2 сила 13 отталкивания составляет основную часть действующей на преобразователь 2 силы поступательного движения, однако движение преобразователя 2' вызывается также силой 12 притяжения, действующей между преобразователем 2' и статором 1.

На фиг. 18 показан результат моделирования с помощью способа FEM при положении преобразователей 2 на соответствующем одинаковом расстоянии до статора 1.

На фиг. 19 показана диаграмма, согласно которой сравнивается вычисленная с помощью моделирования FEM сила поступательного движения с измеренной на испытательной установке силой поступательного движения. При измерении и моделировании рассматривался преобразователь 2 с постоянным намагничиванием 1050,0 кА/м. Статор 1 для выполнения измерения на испытательной установке нагружался 9 А. Для выполнения моделирования учитывалась нагрузка статора 1 в 9 А, при этом полученные значения экстраполировались на нагрузку в 90 А.

На диаграмме согласно фиг. 19 четко показано, что моделирование на основе поясненной выше теории и измерения, по существу, дают одинаковые результаты.

На фиг. 20 показано сравнение вычисленной с помощью моделирования FEM на основе указанных выше теоретических выкладок силы поступательного движения при различном намагничивании преобразователей 2, выполненных в виде постоянных магнитов. На диаграмме вычисленная сила поступательного движения нанесена по оси у, а положение преобразователя 2 - по оси х. С помощью показанной на

фиг. 20 диаграммы иллюстрируется влияние намагничивания преобразователей 2, выполненных в виде постоянных магнитов, при нагрузке статора 1 в 9 А, а затем экстраполированной на нагрузку в 90 А. Показанный на диаграмме граф "моделированная сила в Н" является кривой, воспроизводящей общее прохождение других графов диаграммы. Граф "моделированная сила" показан также на диаграмме на фиг. 19 в виде "моделированной силы в Н".

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Магнитный привод, содержащий по меньшей мере один магнит (1, 1') статора и по меньшей мере один магнит (2) преобразователя,
 - при этом магнит (2) преобразователя выполнен с возможностью движения вдоль линейно проходящей оси (9) движения в направлении (6) движения магнита преобразователя,
 - при этом направление (6) движения магнита преобразователя задается направляющим блоком (7) и ориентировано в направлении к магниту (1, 1') статора,
 - при этом по меньшей мере один магнит (1, 1') статора и один магнит (2) преобразователя ориентированы вдоль линейно проходящей оси (9) движения,
 - отличающийся тем, что магнитный привод содержит управляющее устройство, при этом управляющее устройство содержит
 - управляющий блок, выполненный с возможностью определения минимального расстояния $r_{\min} > 0$ с учетом силы, возникающей между магнитом (1, 1') статора и магнитом (2) преобразователя, так что действующая на магнит (2) преобразователя результирующая сила в положении X_t магнита (2) преобразователя является максимальной, и
 - распорный элемент, выполненный с возможностью позиционирования между магнитом (1, 1') статора и магнитом (2) преобразователя, или
 - механическое устройство, ограничивающее движение магнита (2) преобразователя и противодействующее силам между магнитом (1, 1') статора и магнитом (2) преобразователя, или
 - устройство измерения, выполненное с возможностью измерения положения магнита (2) преобразователя относительно магнита (1, 1') статора или соответственно временных свойств магнитов, причем управляющее устройство в зависимости от упомянутых значений выполнено с возможностью изменения поляризации магнита (1, 1') статора или магнита (2) преобразователя или напряженности поля магнита (1, 1') статора или магнита (2) преобразователя или обоих магнитов,
 - при этом для действующей на магнит (2) преобразователя силы справедливо соотношение

$$F_{\text{repulsion}}(X_t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{q_{s1a}(X_t)q_{tb}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} + \frac{q_{s1b}(X_t)q_{ta}(X_t)}{\left(X_t - \frac{L_s + L_t}{2}\right)^2} \right\} - \left\{ \frac{q_{s1a}(X_t)q_{ta}(X_t)}{\left(X_t + \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} + \frac{q_{s1b}(X_t)q_{tb}(X_t)}{\left(X_t - \frac{L_s - L_t}{2}\right)^2} \right\},$$

где $q_{s1a}(X_t)$ и $q_{s1b}(X_t)$ - силы магнитных полюсов магнитов (1, 1') статоров,
 $q_{ta}(X_t)$ и $q_{tb}(X_t)$ - силы магнитных полюсов магнита (2) преобразователя,
 $X_t \in \left[\frac{L_s + L_t}{2}; \delta + \frac{L_s + L_t}{2}\right]$ - положение X_t магнита (2) преобразователя,

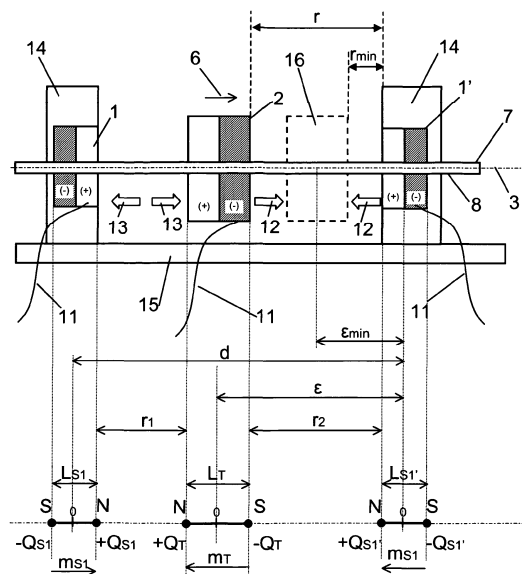
$\delta = d - L_s - L_t$ - участки пути магнита (2) преобразователя, где d - расстояние между центрами статоров,
 L_s - длина магнитов (1, 1') статоров,
 L_t - длина магнита (2) преобразователя.

2. Магнитный привод по п.1, отличающийся тем, что отдельные магниты (4) статора у магнита (1, 1') статора и/или отдельные магниты (5) преобразователя у магнита (2) преобразователя расположены вдоль образующей многоугольник (10) линии вокруг оси многоугольника, ориентированной параллельно направлению (6) движения магнита преобразователя.

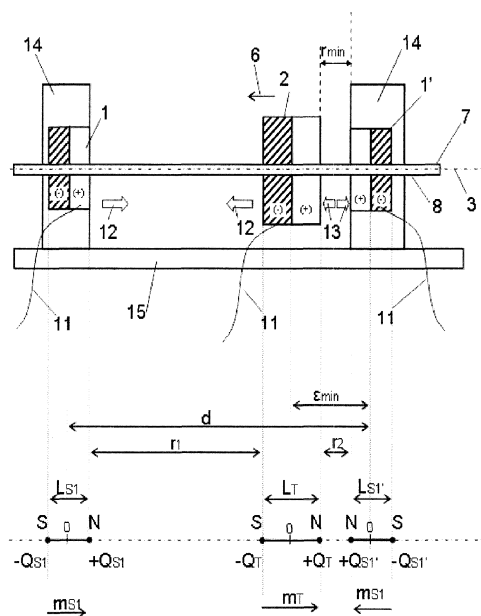
3. Магнитный привод по любому из пп.1 или 2, отличающийся тем, что направляющая ось (8) направляющего блока (7) пересекает магнит (1, 1') статора в зоне между двумя непосредственно соседними отдельными магнитами (4) статора и пересекает магнит (2) преобразователя в зоне между двумя непосредственно соседними отдельными магнитами (5) преобразователя.

4. Магнитный привод по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что движение преобразователя (2) относительно статора (1, 1') является колебательным движением.

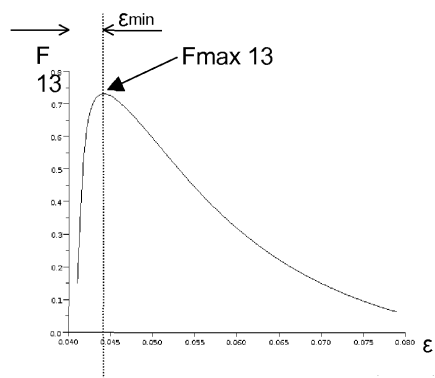
5. Магнитный привод по любому из пп.1-4, отличающийся тем, что объем, расположенный между магнитом (1, 1') статора и магнитом (2) преобразователя, находящимся в положении с наибольшим расстоянием d до магнита (1, 1') статора, является вакуумом.



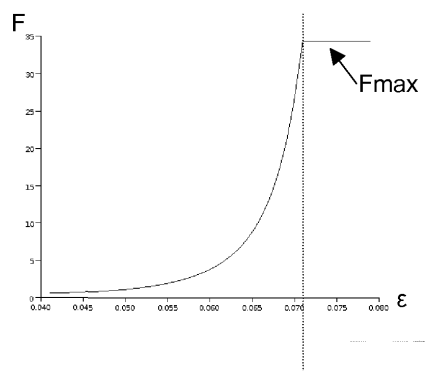
Фиг. 1



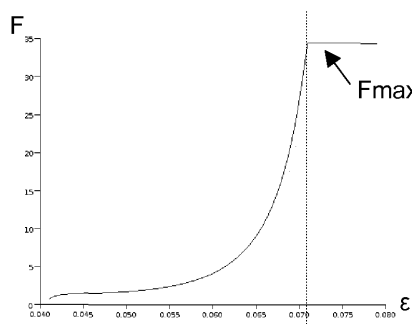
Фиг. 2



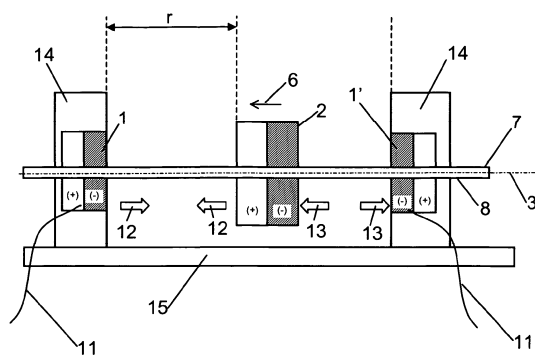
Фиг. 3а



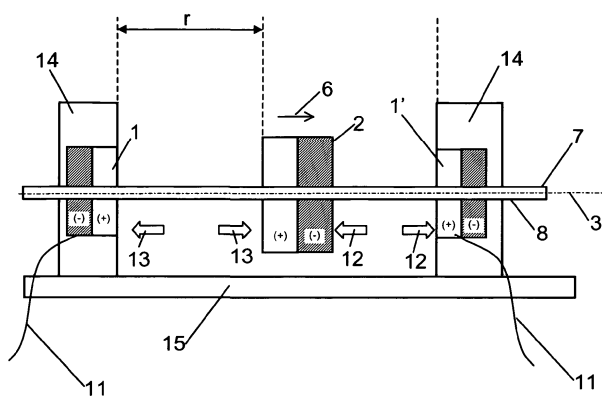
Фиг. 3b



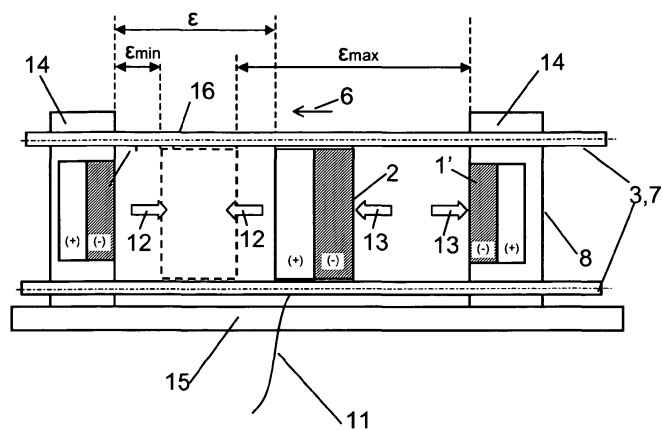
Фиг. 3с



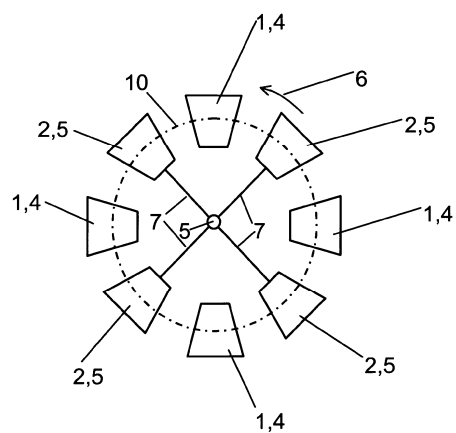
Фиг. 4



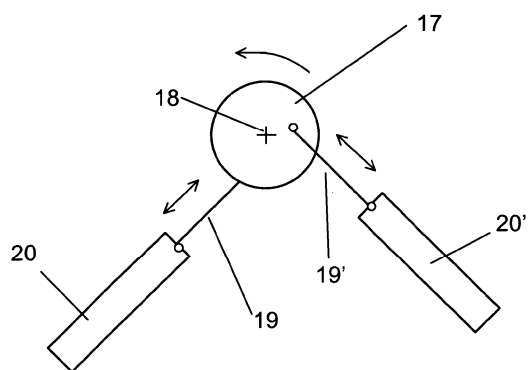
Фиг. 5



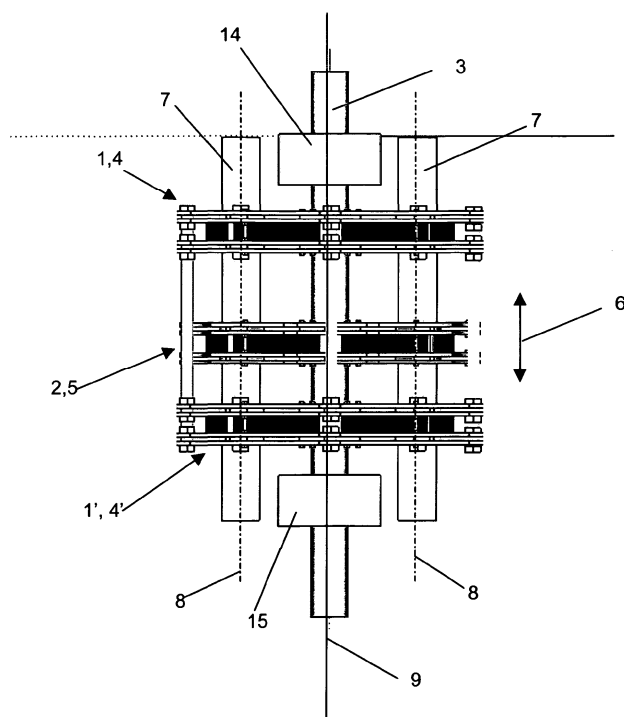
Фиг. 6



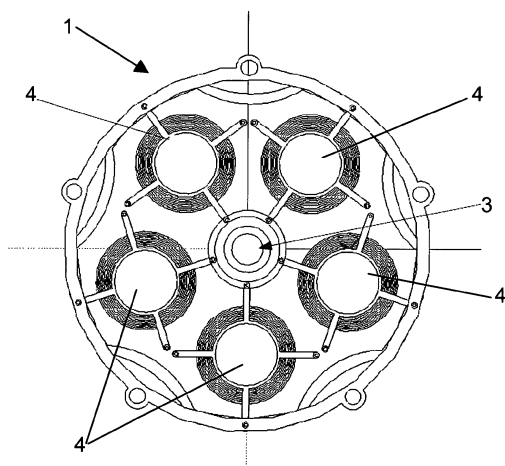
Фиг. 7



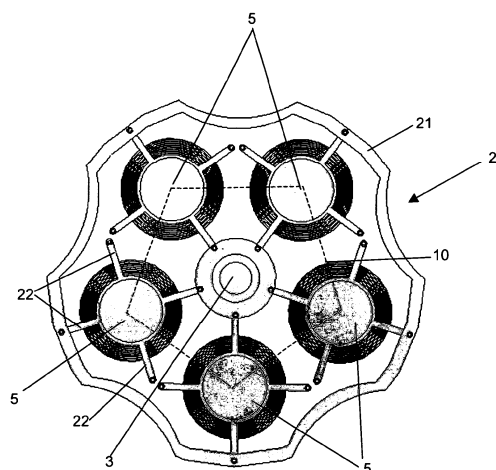
Фиг. 8



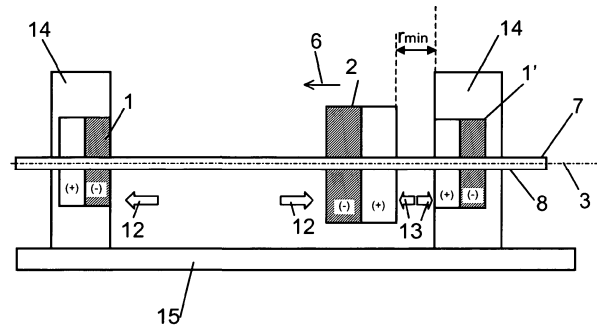
Фиг. 9



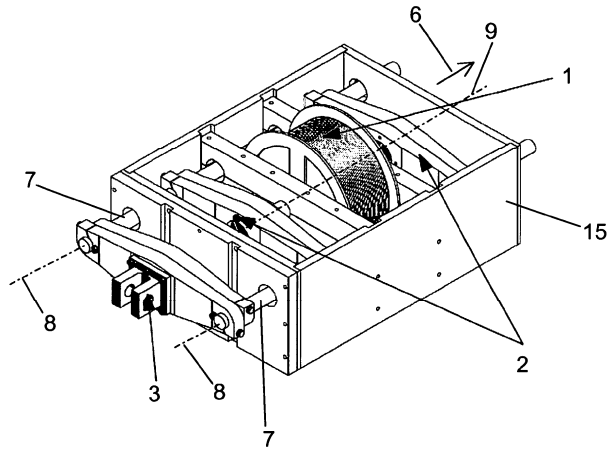
Фиг. 10



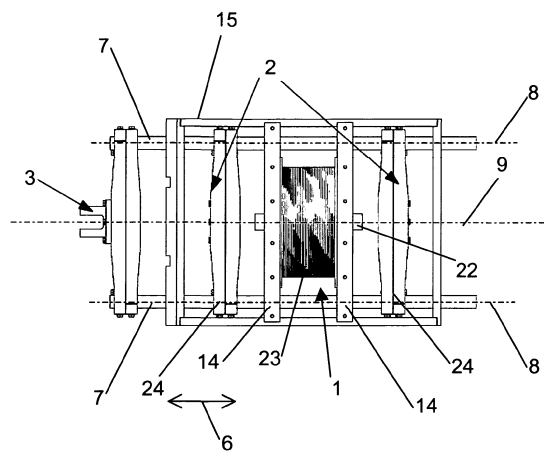
Фиг. 11



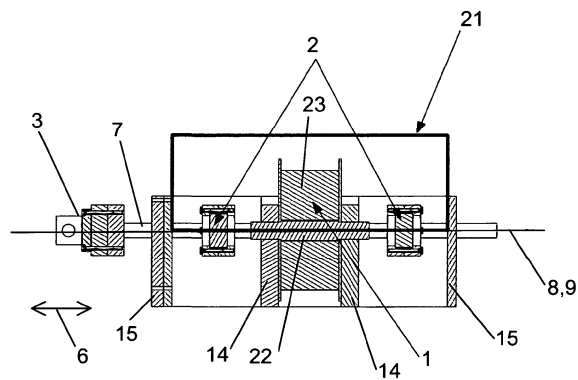
Фиг. 12



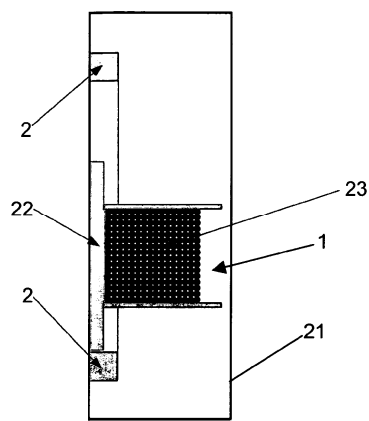
Фиг. 13



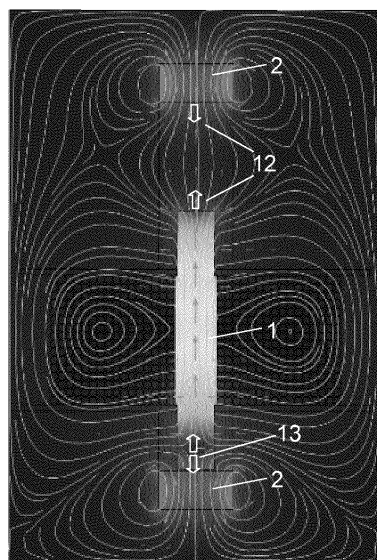
Фиг. 14



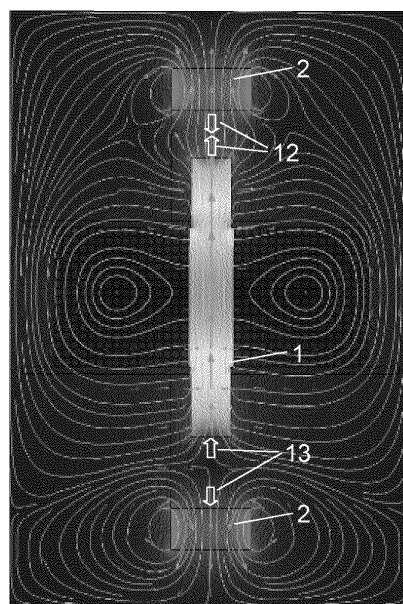
Фиг. 15



Фиг. 16

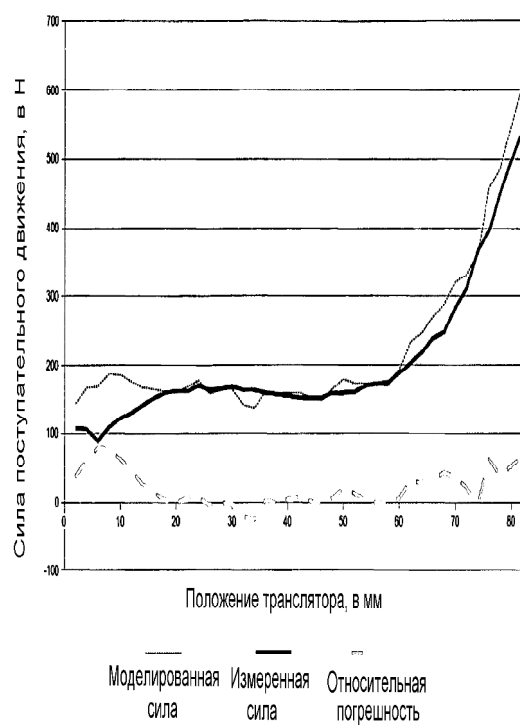


Фиг. 17



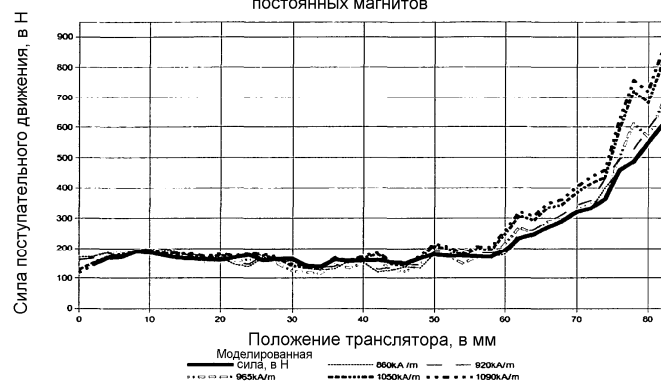
Фиг. 18

Сила поступательного движения
Моделирование при 9А и измерение при 9А



Фиг. 19

Моделированная сила поступательного движения при 90А
Моделирование различных значений намагничивания постоянных магнитов



Фиг. 20

