

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043060**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.04.20

(21) Номер заявки
202191111

(22) Дата подачи заявки
2019.10.22

(51) Int. Cl. **H02K 21/22** (2006.01)
H02K 7/02 (2006.01)
F16C 32/04 (2006.01)
F16F 15/30 (2006.01)
H02K 7/09 (2006.01)

(54) **МАГНИТНЫЕ ПОДШИПНИКИ ДЛЯ ЛЕВИТАЦИИ РОТОРА МАХОВИКА С РАДИАЛЬНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ**

(31) **62/749,083**

(32) **2018.10.22**

(33) **US**

(43) **2021.09.01**

(86) **PCT/IB2019/001140**

(87) **WO 2020/084345 2020.04.30**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ВАТТСАП ПАУЭР А/С (DK)

(72) Изобретатель:
**Спейерманн Мартин, Баль Кристиан,
Нильсен Каспар К., Бьерк Расмус,
Комбескот Валер, Граната Якопо (DK)**

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

(56) JP-A-H08296645
JP-A-H08178011
CN-A-105257698
US-A-5245270
CN-B-101409478
EP-A1-1878913
US-B1-6420810

(57) Система маховика содержит держатель, имеющий нижнюю опору, ротор, характеризующийся гравитационной нагрузкой и выполненный с возможностью вращения над нижней опорой вокруг оси вращения, и нижний магнитный подшипник левитации. Нижний магнитный подшипник левитации включает (a) кольцо первых магнитов, механически соединенных с нижним концом ротора; (b) кольцо вторых магнитов, механически соединенных с нижней опорой под кольцом первых магнитов, при этом вторые магниты отталкивают первые магниты для магнитной поддержки по меньшей мере части гравитационной нагрузки над нижней опорой; (c) кольцо третьих магнитов, механически соединенных с нижним концом; и (d) кольцо четвертых магнитов, механически соединенных с нижней опорой радиально снаружи от кольца третьих магнитов, при этом четвертые магниты отталкивают третьи магниты по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора относительно держателя.

B1

043060

043060
B1

Ссылка на родственные заявки

В заявке на данное изобретение испрашивается приоритет по патентной заявке США № 62/749,083, поданной 22 октября 2018 г., которая полностью включена в настоящее описание путем отсылки.

Предпосылки

Система маховика - механическое устройство, которое запасает энергию вращения во вращающейся массе, т.е. роторе. Количество энергии, хранящейся в роторе, пропорционально квадрату скорости вращения ротора. Ротор может иметь магнитное соединение со статором электромагнитного генератора, что позволяет системе маховика осуществлять преобразования между энергией вращения ротора и электрической энергией. Статор генератора может тормозить ротор для получения электрической энергии из энергии вращения, извлеченной из ротора, и статор генератора может получать электроэнергию и преобразовывать эту электроэнергию в энергию вращения ротора, что приводит к ускорению ротора. Системы маховика могут быть сконструированы так, чтобы иметь большую емкость для хранения энергии и, кроме того, быть способными быстро поглощать и отдавать энергию. Обычно системы маховика применяются для (а) сглаживания пиков выходной мощности другого источника энергии, такого как статор генератора с двигателем внутреннего сгорания; (b) хранения энергии; (c) в качестве резервного источника питания и (d) быстрой отдачи энергии.

Хранение энергии с низкими потерями в системе маховика требует, чтобы ротор вращался с очень низким трением. Потому для ротора маховика с высокими эксплуатационными характеристиками применяется магнитная левитация для противодействия силе тяжести.

Краткое описание изобретения

В одном варианте система маховика включает в себя обойму, содержащую нижнюю опору, ротор, характеризующийся гравитационной нагрузкой и выполненный с возможностью вращения над нижней опорой вокруг оси вращения, и нижний магнитный подшипник левитации. Нижний магнитный подшипник левитации включает (а) кольцо первых магнитов, механически соединенных с нижним концом ротора;

(b) кольцо вторых магнитов, механически соединенных с нижней опорой под кольцом первых магнитов, при этом вторые магниты отталкивают первые магниты для магнитной поддержки по меньшей мере части гравитационной нагрузки над нижней опорой; (c) кольцо третьих магнитов, механически соединенных с нижним концом; и (d) кольцо четвертых магнитов, механически соединенных с нижней опорой радиально снаружи от кольца третьих магнитов, при этом четвертые магниты отталкивают третьи магниты по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора относительно обоймы.

В одном варианте способ левитации и радиальной стабилизации ротора системы маховика содержит этапы, на которых (а) пассивно прилагают направленную вверх магнитную силу к множеству первых магнитов, механически соединенных с ротором, для принятия по меньшей мере части гравитационной нагрузки ротора и (b) пассивно прилагают направленную внутрь радиальную силу к множеству вторых магнитов, механически соединенных с ротором, по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора.

Краткое описание фигур

Фиг. 1 - система маховика, содержащая магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 2 - система маховика, имеющая вращающийся вал вращения и содержащая магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 3 - система маховика, имеющая неподвижный вал вращения и содержащая магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 4 - четырехкольцевой магнитный подшипник левитации, обеспечивающий и осевую, и радиальную стабилизацию, по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 5 - система маховика, в которой применяется четырехкольцевой магнитный подшипник левитации по фиг. 4 по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 6-8 - три соответствующие конфигурации высот четырехкольцевого магнитного подшипника левитации по фиг. 4, реализованные в системе маховика по фиг. 5 по вариантам настоящего изобретения.

Фиг. 9 - одна конфигурация полярности четырехкольцевого магнитного подшипника левитации по фиг. 4, реализованная в системе маховика по фиг. 5 по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 10 - другая конфигурация полярности четырехкольцевого магнитного подшипника левитации по фиг. 4, реализованная в системе маховика по фиг. 5 по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 11 - другая система маховика, содержащая другой четырехкольцевой магнитный подшипник левитации, обеспечивающий и осевую, и радиальную стабилизацию, по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 12-14 - три соответствующие конфигурации высот четырехкольцевого магнитного подшипника левитации по фиг. 11 по вариантам настоящего изобретения.

Фиг. 15 - система маховика, имеющая (а) неподвижный вал, (b) по меньшей мере один магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией и (c) другие магнитные модули, расположенные на неподвижном валу на расстоянии по меньшей мере от одного магнитного подшипника левитации.

тации по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 16 - иллюстрация способа левитирующей подвески и радиальной стабилизации ротора системы маховика по варианту настоящего изобретения.

Фиг. 17 - пример осевых и радиальных сил, рассчитанных для разных магнитных подшипников, рассчитанных на 300 кг ротор.

Фиг. 18 - пример осевых и радиальных сил, рассчитанных для разных магнитных подшипников левитации, рассчитанных на 1500 кг ротор.

Подробное описание вариантов

Системы маховиков рассчитываются на применение в морских и сухопутных условиях без соединения с обычной электрической сетью, а с использованием так называемой микросети. В таких условиях системы маховиков могут служить источником энергии и, например, выполнять такие функции, как хранение энергии, резервное питание, сглаживание пиков и/или управление частотой. Системы маховиков могут применяться для удовлетворения высокого кратковременного спроса на энергию. При применении в потенциально нестабильных средах, таких как на борту бурового судна, на полупогружной буровой платформе или на другом морском судне, или в сейсмически опасных зонах система маховика подвержена воздействию существенных сил, которые могут повлиять как на эксплуатационные характеристики, так и на срок службы системы маховика.

В системах маховиков часто применяют магнитный подшипник левитации, который заставляет ротор левитировать над основанием системы маховика. Обычно магнитный подшипник левитации выполнен с возможностью противодействовать силе тяжести и для этого прилагает направленную вдоль оси силу к ротору, вращающемуся вокруг по существу вертикальной оси вращения. Здесь термин "осевой" относится к направлению, параллельному оси вращения маховика, а "радиальный" относится к направлению, перпендикулярному этой оси вращения и проходящему либо от оси вращения, либо к ней. Известный магнитный подшипник левитации содержит первый набор постоянных магнитов, прикрепленных к дну ротора, и второй набор постоянных магнитов, прикрепленных к основанию под первым набором постоянных магнитов. Эти два набора постоянных магнитов отталкиваются друг от друга для приложения к ротору направленной вверх силы. Однако отталкивающий характер магнитной связи между первым и вторым наборами постоянных магнитов создает нестабильное равновесие в положении ротора, соответствующем первому набору постоянных магнитов, когда он идеально выровнен над вторым набором постоянных магнитов. Следовательно, хотя направленная вверх сила, генерируемая известным магнитным подшипником левитации, может стабилизировать положение ротора в осевом направлении, известному магнитному подшипнику присуща нестабильность в радиальном направлении. Системы маховиков с высокими эксплуатационными характеристиками могут содержать активные магнитные подшипники для активной стабилизации положения ротора в радиальном направлении, когда радиальная нестабильность возникает в результате, например, (а) движения среды, на которой базируется маховик, или (б) крутящего момента, приложенного к ротору мотор-генератором для ускорения или торможения ротора. Такие активные магнитные подшипники также могут противодействовать радиальной нестабильности, вносимой известным магнитным подшипником.

К сожалению, такая активная стабилизация основана на электроэнергии, и любая работа, выполняемая активным магнитным подшипником, следовательно, в итоге снижает энергетическую эффективность системы маховика.

Согласно настоящему изобретению предлагается система маховика с магнитными подшипниками левитации для левитации ротора маховика, одновременно обеспечивая стабилизацию в радиальном направлении. Раскрываемые магнитные подшипники левитации могут выполнять и осевую, и радиальную стабилизацию, используя пассивную магнитную связь без потребления электроэнергии. Радиальная стабилизация, создаваемая раскрываемыми магнитными подшипниками левитации, может преодолеть или по меньшей мере уменьшить радиальную нестабильность, инициируемую осевой стабилизацией и создаваемую магнитным подшипником левитации. Раскрываемые магнитные подшипники левитации, таким образом, позволяют повысить энергетическую эффективность системы маховика.

На фиг. 1 показана одна система 100 маховика, содержащая магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией. На фиг. 1 система 100 маховика показана в сценарии иллюстративного использования, где система 100 маховика расположена на фундаменте 180, который по меньшей мере иногда может совершать движения. Система 100 маховика содержит ротор 110 и нижнюю опору 122. Ротор 110 выполнен с возможностью вращения вокруг оси 190 вращения в направлении 192 или в противоположном направлении. Система 100 маховика далее содержит нижний магнитный подшипник 130 левитации, который заставляет ротор 110 левитировать над нижней опорой 122, в то же время обеспечивая стабилизацию в радиальном направлении относительно оси 190 вращения ротора 110. Система 100 маховика может быть выполнена с возможностью работы при нормально вертикальной оси 190 вращения так, чтобы нижний магнитный подшипник 130 левитации поддерживал по меньшей мере часть гравитационной нагрузки ротора 110 над нижней опорой 122. В настоящем описании, если не оговорено иное, "ось вращения" ротора относится к номинальной оси ротора и понимается, что фактическая ось вращения ротора может по меньшей мере временно отклоняться от номинальной оси вращения.

Нижний магнитный подшипник 130 левитации содержит магнитную структуру 132, механически соединенную с нижней опорой 122, и магнитную структуру 134, механически соединенную с нижним концом ротора 110. Магнитная структура 132 отталкивает магнитную структуру 134 для приложения к ротору 110 и (а) направленную вверх осевую силу в направлении 194, и (б) направленную радиально внутрь силу, противоположную направлению 196. Направленная внутрь радиальная сила противодействует радиальному децентрированию ротора 110. Такое радиальное децентрирование может возникнуть в результате неустойчивости, связанной с магнитным полем, создающим направленную вверх осевую силу, в результате движения среды, в которой находится система 100 маховика, и/или в результате крутящего момента, прилагаемого к ротору 110 другими функциональными компонентами системы 100 маховика. В одном варианте магнитные структуры 132 и 134 являются пассивными магнитными структурами, использующими постоянные магниты так, что нижний магнитный подшипник 130 левитации не потребляет энергии.

В сценарии, показанном на фиг. 1, нижняя опора 122 поддерживается фундаментом 180, например, полом здания или палубой морского судна. Нижняя опора 122 по существу жестко соединена с фундаментом 180 и поэтому движется вместе с фундаментом 180, когда он движется. Фундамент 180 может двигаться в разных направлениях, например горизонтально прямолинейно, как показано стрелкой 152, вертикально прямолинейно, как показано стрелкой 154, и поворотом, как показано стрелкой 150, или совершать эти движения в комбинации. Осевая и радиальная стабилизация ротора 110, обеспечиваемая нижним магнитным подшипником 130 левитации, может по меньшей мере частично противодействовать относительному движению между ротором 110 и нижней опорой 122, вызванному движением фундамента 180.

Вес ротора 110 может составлять от 10 до 10000 кг. В одном варианте, предназначенном для хранения относительно большого количества энергии вращения в роторе 110, например в системе 100 маховика, предназначенного для эксплуатации в морских условиях, вес ротора 110 составляет от 1 до 2 т, например, 1,5 т. В других вариантах, предназначенных для хранения меньшего количества энергии вращения в роторе 110, например в системе 100 маховика, предназначенной для бытового применения, вес ротора 110 составляет от 10 до 100 кг.

В одном варианте система 100 маховика далее содержит верхнюю опору 124, расположенную над верхним концом ротора 110. Нижняя опора 122 и верхняя опора 124 могут быть частями обоймы 120. Хотя на фиг. 1 это не показано для ясности, варианты системы 100 маховика, содержащие верхнюю опору 124, далее могут содержать верхний магнитный подшипник. Этот верхний магнитный подшипник может быть идентичен или подобен нижнему магнитному подшипнику 130 левитации и, например, содержать второй экземпляр магнитной структуры 132, механически соединенной с верхней опорой 124, и второй экземпляр магнитной структуры 134, соединенной с верхним концом ротора 110. Этот верхний магнитный подшипник, если он используется, ограничивает направленное вверх движение ротора 110 и обеспечивает радиальную стабилизацию ротора 110 на его верхнем конце. Ограничение направленного вверх движения ротора 110 может быть полезным в сценариях, когда фундамент 180 движется вниз (и вверх), поскольку в таких сценариях расстояние между ротором 110 и верхней опорой 124 имеет тенденцию уменьшаться. Верхний магнитный подшипник может служить для предотвращения ударов ротора 110 в верхнюю опору 124, в то же время обеспечивая радиальную стабилизацию.

Хотя на фиг. 1 показаны ротор 110, магнитная структура 132 и магнитная структура 134, имеющие цилиндрическую форму, форма любого из ротора 110, магнитной структуры 132 и магнитной структуры 134 может отклоняться от цилиндрической. Например, поверхность ротора 110 может иметь углубления и/или выступающие части для размещения и позиционирования функциональных компонентов, которые обеспечивают взаимодействие между ротором 110 и обоймой 120. Аналогично, форма нижней опоры 122 и верхней опоры 124 может отличаться от показанной на фиг. 1.

В настоящем описании термины "верхний" и "нижний", относящиеся к компоненту системы маховика, привязаны к вертикальной оси 190 вращения. Следует понимать, что описываемая здесь система маховика может быть ориентирована с не вертикальной осью вращения, например, перед монтажом в рабочей среде или когда рабочая среда заставляет ориентацию номинально вертикальной оси вращения отклониться от вертикали (например, в время движения и/или колебаний фундамента, поддерживающего систему маховика, предназначенной для работы по существу с вертикальной ориентацией оси вращения). Термины "над" и "под" в настоящем описании также привязаны к вертикальной оси вращения.

На фиг. 2 показана система 200 маховика, имеющая вращающийся вал и содержащая магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией. На фиг. 2 система 200 маховика показана в сечении, проходящем в плоскости, содержащей ось 190 вращения. Система 200 маховика является вариантом системы 100 маховика. Система 200 маховика содержит ротор 210, нижнюю опору 222 и нижний магнитный подшипник 130 левитации. Ротор 210 является вариантом ротора 110, который содержит вал 212. Вал 212 вращается вместе с остальной частью ротора. Нижняя опора 222 является вариантом нижней опоры 122, специально приспособленным для стыковки (по меньшей мере магнитным способом) с ротором 210 и его валом 212. Магнитная структура 132 механически соединена с нижней опорой 222, а магнитная структура 134 механически соединена с нижним концом ротора 210.

В некоторых вариантах система 200 маховика далее содержит верхнюю опору 224 и верхний магнитный подшипник 230 левитации. Верхняя опора 224 является вариантом верхней опоры 124, специально приспособленным для стыковки (по меньшей мере магнитным способом) с ротором 210 и его валом 212. Как описано выше со ссылками на фиг. 1, верхний магнитный подшипник 230 левитации может быть идентичен или подобен нижнему магнитному подшипнику 130 левитации. Верхний магнитный подшипник 230 левитации содержит магнитную структуру, механически соединенную с верхней опорой 224, и магнитную структуру 234, механически соединенную с верхним концом ротора 210. Магнитная структура 232 может быть идентична или подобна магнитной структуре 132, а магнитная структура 234 может быть идентична или подобна магнитной структуре 134.

В пространстве между нижней опорой 222 и ротором 210 и в пространстве между верхней опорой 224 (если она имеется) и ротором 210 система 200 маховика образует область 280 интерфейса. В области 280 интерфейса находится нижний магнитный подшипник 130 левитации и, когда имеется верхняя опора 224, верхний магнитный подшипник 230 левитации. В области 280 интерфейса также могут находиться другие функциональные компоненты, которые способствуют взаимодействию между (а) ротором 210 и (b) нижней опорой 222 и верхней опорой 224 (если она имеется). Такие функциональные компоненты могут включать (а) один или более генераторов, которые магнитным способом преобразуют энергию вращения ротора в электрическую энергию, выводимую из системы маховика и, наоборот, преобразуют магнитным способом электроэнергию, подаваемую на систему маховика в энергию вращения ротора, и/или (b) один или более активных магнитных подшипников, которые активно стабилизируют положение ротора относительно обоймы. Активный магнитный подшипник (подшипники) может дополняться одним или более пассивным резервным магнитным подшипником, обеспечивая стабилизацию ротора в случае отказа активных магнитных подшипников. В настоящем описании термин "активный магнитный подшипник" относится к подшипнику, имеющему возможность регулировки на основе входного сигнала. Активный магнитный подшипник может иметь один или более датчиков в контуре обратной связи.

Обойма 220 далее может содержать радиальную стенку 228, которая взаимодействует с нижней опорой 222 и верхней опорой 224 для образования кожуха, в котором находится ротор 210. Этот кожух может быть вакуумным кожухом.

Ротор 210 имеет поперечный размер 262 и высоту 260. В одном варианте поперечный размер 262 постоянен вдоль оси 190 вращения. В другом варианте поперечный размер меняется как функция положения на оси вращения, например, как описано выше со ссылками на фиг. 1. Поперечный размер 262 может быть диаметром. И поперечный размер 262, и высота 260 могут быть в диапазоне от 10 до 200 см.

На фиг. 3 показана одна система 300 маховика, имеющая неподвижный вал и содержащая магнитный подшипник для левитации ротора с радиальной стабилизацией. На фиг. 3 показана система 300 маховика в сечении, проходящем в плоскости, в которой расположена ось 190 вращения. Система 300 маховика является вариантом системы 100 маховика. Система 300 маховика содержит ротор 300 и обойму 320, являющиеся соответствующими вариантами ротора 110 и обоймы 120. Обойма 320 содержит нижнюю опору 322, верхнюю опору 324 и неподвижный вал 326, соединяющий нижнюю опору 322 и верхнюю опору 324. Неподвижный вал 326 проходит сквозь отверстие в роторе 310 так, чтобы ротор 310 вращался вокруг неподвижного вала 326. Нижняя опора 322 и верхняя опора 324 являются вариантами нижней опоры 122 и верхней опоры 124 соответственно, специально сконфигурированными для использования с неподвижным валом 326 и ротором 310. Обойма 320 далее может содержать радиальную стенку 228. Радиальная стенка 228 может взаимодействовать с нижней опорой 322 и верхней опорой 324 для формирования кожуха для ротора 310. Этот кожух может быть вакуумным кожухом.

Система 300 маховика далее содержит нижний магнитный подшипник 130 левитации. Магнитная структура 132 механически соединена с нижней опорой 322, а магнитная структура 134 механически соединена с нижним концом ротора 310. Система 300 маховика также может иметь верхний магнитный подшипник 230 левитации с магнитными структурами 132 и 134, механически соединенными с верхней опорой 324 и верхним концом ротора 310 соответственно.

Система 300 маховика образует область 380 интерфейса, в которой могут находиться функциональные компоненты, способствующие взаимодействию между ротором 310 и обоймой 320. По сравнению с областью 280 интерфейса системы 200 маховика, область 380 интерфейса системы 300 маховика дополнительно содержит пространство в отверстии 312 между неподвижным валом 326 и ротором 310. Благодаря наличию отверстия 312, проходящему по всей высоте 260 ротора 310 и неподвижного вала 326, проходящего по всей высоте отверстия 312, система 300 маховика имеет относительно большую и расширенную область 380 интерфейса между ротором 110 и обоймой 120 по сравнению с областью 280 интерфейса системы 200 маховика. Эта относительно большая и расширенная область 380 интерфейса допускает наличие относительно больших расстояний между разными магнитными компонентами, реализованными в системе 300 маховика, поэтому разные магнитные компоненты можно расположить так, чтобы минимизировать потенциальную магнитную связь между такими различными магнитными компонентами. В частности, эта большая и расширенная область 380 интерфейса позволяет расположить нижний магнитный подшипник 130 левитации и верхний магнитный подшипник 230 левитации относи-

тельно далеко от других источников магнитного поля. Область 380 интерфейса, таким образом, может создавать оптимальные условия для осевой и радиальной стабилизации нижним магнитным подшипником и, если он имеется, верхним магнитным подшипником 230 левитации. Это является особенно существенным преимуществом для вариантов с нижним магнитным подшипником 130 левитации и верхним магнитным подшипником 230 левитации, которые являются чисто пассивными, поскольку в таких вариантах нижний магнитный подшипник 130 левитации и верхний магнитный подшипник 230 левитации не могут активно регулироваться для компенсации наличия других магнитных полей. В вариантах систем 200 и 300 маховика, где другие источники магнитного поля расположены ближе к нижнему магнитному подшипнику 130 левитации (и, если он имеется, к верхнему магнитному подшипнику 230 левитации), можно реализовать магнитное экранирование для уменьшения влияния таких других источников магнитного поля на эксплуатационные характеристики нижнего магнитного подшипника 130 левитации (и, если он имеется, верхнего магнитного подшипника 230 левитации).

Неподвижный вал 326 и отверстие 312 имеют соответствующие поперечные размеры 370 и 372. В одном варианте каждый из поперечных размеров 370 и 372 является постоянным вдоль оси 190 вращения. В другом варианте один или оба из поперечных размеров 370, 372 изменяются как функция положения на оси вращения. Каждый из поперечных размеров 370 и 372 может быть диаметром. Разница между поперечными размерами 370 и 372 может находиться в диапазоне от 1 до 20 мм. Отношение поперечного размера 372 к поперечному размеру 262 может находиться в диапазоне от 5 до 50%. Поперечный размер 370 может находиться в диапазоне от 3 до 100 мм. неподвижный вал 326 может содержать сталь или может быть выполнен из стали, например нержавеющей стали.

На фиг. 4 представлен вид в перспективе одного четырехкольцевого магнитного подшипника 400, который обеспечивает и осевую, и радиальную стабилизацию. Четырехкольцевой магнитный подшипник 400 является примером любого из верхнего магнитного подшипника 130 левитации и нижнего магнитного подшипника 230 левитации. Четырехкольцевой магнитный подшипник 400 может применяться в одной из систем 200 и 300 маховика.

На фиг. 5 показан вид сбоку в сечении системы 500 маховика, в которой применяется четырехкольцевой магнитный подшипник 400. Система 500 маховика является вариантом системы 100 маховика, в котором применен один или оба из нижнего магнитного подшипника 130 левитации и верхнего магнитного подшипника 230 левитации в форме четырехкольцевого магнитного подшипника 400. В нижеследующем описании фиг. 4 и 5 лучше всего рассматривать совместно. На фиг. 5 показан четырехкольцевой магнитный подшипник 400 в перспективе с направления, которое, когда магнитный подшипник применяется в системе 500 маховика, проходит через ротор 110.

Четырехкольцевой магнитный подшипник 400 содержит (а) кольцо 410 магнитов 412, (b) кольцо 420 магнитов 422, (с) кольцо 430 магнитов 432 и (d) кольцо 440 магнитов 442. Каждое из колец 410, 420, 430, 440 окружает ось 190 вращения.

Кольца 410 и 430 образуют вариант магнитной структуры 134, а кольца 420 и 440 образуют вариант магнитной структуры 132. В одном варианте использования кольца 420 и 440 механически соединены с дном ротора 110, а кольца 420 и 440 механически соединены с нижней опорой 122 (как показано на фиг. 5) так, что четырехкольцевой магнитный подшипник 400 образует вариант нижнего магнитного подшипника 130 левитации. В другом варианте применения кольца 410 и 430 механически соединены с верхним концом ротора 110, а кольца 420 и 440 механически соединены с верхней опорой 124 так, что четырехкольцевой магнитный подшипник 400 образует вариант верхнего магнитного подшипника 230 левитации. В одном варианте каждый из магнитов 412, 422, 432 и 442 является постоянным магнитом, и четырехкольцевой магнитный подшипник 400 выполнен с возможностью выполнять массивную магнитную стабилизацию. Кольца 410 и 430 могут быть по существу концентрическими, и кольца 420 и 440 могут быть по существу концентрическими. Когда ротор 110 радиально отцентрирован относительно оси 190 вращения, кольца 410, 420, 430 и 440 могут быть концентрическими.

Магниты 422 отталкивают магниты 412 так, что сила, возникающая между ними, является по существу или преимущественно осевой, обеспечивая осевую стабилизацию. Магниты 442 отталкивают магниты 432 так, что сила, возникающая между ними, содержит радиальный компонент, обеспечивая радиальную стабилизацию. Сила, возникающая между магнитами 442 и 432, далее может содержать осевой компонент и, тем самым участвовать в осевой стабилизации в дополнение к радиальной стабилизации. Радиальная стабилизация, создаваемая магнитной связью между магнитами 442 и магнитами 432, может преодолеть или по меньшей мере ослабить радиальную нестабильность, создаваемую магнитной связью между магнитами 422 и 412.

В примере, показанном на фиг. 4, каждый из магнитов 412, 422, 432 и 442 имеет форму куба. Каждый куб может иметь длину стороны в диапазоне от 1 до 20 мм, например, от 2 до 4 мм. Однако, не выходя за пределы объема настоящего изобретения, форма и/или размеры одного или более из магнитов 412, 422, 432 и 442 могут отличаться от показанных на фиг. 4, и количество магнитов в одном или более из колец 410, 420, 430, 440 может отличаться от показанного на фиг. 4. Зазор между кольцом 410 и кольцом 420 может находиться в диапазоне от нескольких миллиметров до долей миллиметра. Зазор между кольцами 410 и 420 может быть задан таким, чтобы добиться требуемой величины

осевой силы между ними. Аналогично, радиальное расстояние (и также осевое расстояние) между кольцами 430 и 440 может быть задано так, чтобы добиться требуемой величины радиальной (и также осевой) силы между ними. В одном варианте кольца 410, 420, 430 и 440 сконфигурированы для создания большей осевой силы, чем радиальной силы.

Как показано на фиг. 5, кольца 410, 420, 430 и 440 имеют соответствующие диаметры 518, 528, 538 и 548 и расположены на соответствующих высотах 516, 526, 536 и 546 относительно нижней опоры 122. Следует понимать, что эти высоты могут меняться, когда ротор 110 движется относительно нижней опоры 122, и что эти высоты обозначают номинальные высоты, свойственные стабильной и желательной конфигурации системы 500 маховика. Высота 516 превышает высоту 526. Диаметры 518 и 528 могут быть по существу идентичными, как показано на фиг. 4 и 5, или немного отличаться друг от друга. Диаметр 548 превышает диаметр 538, а диаметр 538 превышает диаметры 528 и 518. Высота 536 превышает высоту 516. В примере, показанном на фиг. 4 и 5 высота 536 превышает высоту 546. Однако, не выходя за пределы настоящего изобретения, высоты 536 и 546 могут быть одинаковыми или высота 536 может быть меньше высоты 546.

На фиг. 4 показан пример полярностей магнитов 412, 422, 432 и 442. Острия 482 означают северные полюса, а прямые концы 480 означают южные полюса. В приведенном примере (а) полярность каждого из магнитов 412 и 422 параллельна оси 190 вращения так, что в системе 500 маховика северные полюса магнитов 412 обращены к ротору 110, а северные полюса магнитов 422 обращены от ротора 110, и (б) полярность каждого из магнитов 432 и 442 перпендикулярна оси 190 вращения так, что северные полюса магнитов 432 обращены от оси 190 вращения, а северные полюса магнитов 442 обращены к оси 190 вращения.

Не выходя за пределы объема настоящего изобретения, можно применять разные направления полярности при условии, что кольца 410 и 420 отталкиваются друг от друга и кольца 430 и 440 отталкиваются друг от друга. В одном примере высоты 536 и 546 отличаются друг от друга и полярность магнитов 432 и 442 обращена друг к другу вдоль направления, которое проходит под непрямым углом к оси 190 вращения.

Система 500 маховика может содержать держатель 552, который механически соединяет кольца 420 и 440 с нижней опорой 122. Как показано на фиг. 5, в роторе 110 может иметься канавка, окружающая ось 190 вращения, в которую выступает держатель 552 так, чтобы поместить кольца 410, 420, 430, 440 в требуемые положения относительно друг друга. Альтернативно, ротор 110 может иметь держатель (не показан на фиг. 5), который выступает к нижней опоре 122 так, чтобы поместить кольца 410, 420, 430, 440 в нужные положения относительно друг друга. В одном варианте кольца 410 и 430 прикреплены к держателю 550 в или на роторе 110.

Фиг. 6-8 иллюстрируют три соответствующие конфигурации высот 600, 700 и 800 в четырехкольцевом магнитном подшипнике 400 в системе 500 маховика. Вид на каждой из фиг. 6-8 соответствует виду на левой части фиг. 5. В нижеследующем описании фиг. 6-8 лучше всего рассматривать совместно. Конфигурации 600, 700 и 800 высот отличаются друг от друга отношением между высотой 536 кольца 430 и высотой 546 кольца 440 (см. определения высот на фиг. 5). В конфигурации 600 высоты 536 и 546 идентичны. В конфигурации 700 высота 536 превышает высоту 546. В конфигурации 800 высота 536 меньше высоты 546.

В конфигурации 600 на номинальных высотах магнитная связь между кольцами 430 и 440 соответствует чисто радиальной силе, возникающей между ними. В конфигурациях 600 и 700 на соответствующих номинальных высотах сила, связанная с магнитной связью между кольцами 430 и 440, имеет и радиальный, и осевой компонент. В конфигурации 700 на номинальных высотах осевой компонент силы соответствует направленной вверх силе, действующей на ротор 110 в направлении от нижней опоры 122. Таким образом, на номинальных высотах в конфигурации 700 осевой компонент силы между кольцами 430 и 440 дополнительно участвует в осевой стабилизации, создаваемой магнитной связью между кольцами 410 и 420. Наоборот, на номинальных высотах в конфигурации 800 осевой компонент силы между кольцами 430 и 440 выталкивает ротор 110 к нижней опоре 122 и, таким образом, работает против осевой силы, создаваемой магнитной связью между кольцами 410 и 420. При работе на систему 500 маховика может действовать осевое движение среды, например фундамента 180, и отношение между высотами 635 и 546 в результате такого осевого движения может меняться динамически.

Данные, приведенные ниже в примере 1, показывают, что конфигурация 800, по меньшей мере в определенных условиях, является нестабильной. Пример 1 демонстрирует, что осевая отталкивающая сила, прилагаемая кольцами 420 и 440 к кольцам 410 и 430, уменьшается, когда высота 536 становится меньше высоты 546. Поэтому конфигурации 600 и 700 высот могут дать большую стабильность, чем конфигурация 800. Кроме того, поскольку любое направленное вниз движение ротора 110 в конфигурации 600 высот по существу соответствует конфигурации 800 и возникновение такого движения во время практической эксплуатации системы 500 маховика вероятно, конфигурация 700 высот может дать большую стабильность, чем конфигурация 600. В одном варианте система 500 маховика сконфигурирована в соответствии с конфигурацией 700 высот с номинальными высотами 536 и 546, настроенными так, чтобы даже во время движения фундамента 180 кольцо 430 оставалось выше кольца 440.

На фиг. 6-8 полярность колец 410, 420, 430 и 440 показана стрелками внутри этих колец. Как было описано выше со ссылками на фиг. 4 и 5, полярность может отличаться от показанной на фиг. 6-8.

На фиг. 9 показана одна конфигурация 900 полярности четырехкольцевого магнитного подшипника 400 в системе 500 маховика. Конфигурация 900 полярности может быть реализована вместе с любой из конфигураций 600, 700, 800 высот. В конфигурации 900 полярности полярность колец 410 и 430 такова, что либо (а) северный полюс кольца 410 находится ближе к южному полюсу кольца 430, чем северный полюс кольца 430, и южный полюс кольца 430 находится ближе к северному полюсу кольца 410, чем к южному полюсу кольца 410, либо (б) южный полюс кольца 410 находится ближе к северному полюсу кольца 430, чем к южному полюсу кольца 430, и северный полюс кольца 430 находится ближе к южному полюсу кольца 410, чем к северному полюсу кольца 410. В результате соответствующие магнитные поля колец 410 и 430 достаточно выровнены друг с другом. Если между кольцами 410 и 430 отсутствует существенное магнитное экранирование, магнитные поля колец 410 и 430 могут взаимодействовать для формирования комбинированного магнитного поля 950. Держатель 550 может быть изготовлен из немагнитного материала, чтобы способствовать формированию комбинированного магнитного поля 950 этой комбинацией магнитных полей.

На фиг. 10 показана другая конфигурация 1000 полярности четырехкольцевого подшипника 400 в системе 500 маховика. Конфигурация 1000 полярности может использоваться с любой из конфигураций 600, 700, 800 высот. В конфигурации 1000 полярности отношение полярностей между кольцами 410 и 430 таково, что либо (а) северный полюс кольца 410 находится ближе к северному полюсу кольца 430, чем к южному полюсу кольца 430, а северный полюс кольца 430 находится ближе к северному полюсу кольца 410, чем к южному полюсу кольца 410, либо (б) южный полюс кольца 410 находится ближе к южному полюсу кольца 430, чем к северному полюсу кольца 430, а южный полюс кольца 430 находится ближе к южному полюсу кольца 410, чем к северному полюсу кольца 410. В результате соответствующие магнитные поля колец 410 и 430 не выровнены друг с другом. Во избежание взаимного гашения магнитных полей колец 410 и 430 в конфигурации 1000 полярности можно использовать магнитный экран 1050 между кольцами 410 и 430.

На фиг. 11 приведен вид сбоку в сечении, аналогичный виду на фиг. 5, другой системы 1100 маховика, которая содержит другой четырехкольцевой магнитный подшипник 1102, обеспечивающий и осевую, и радиальную стабилизацию. Четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 является примером любого из нижнего магнитного подшипника 130 левитации и верхнего магнитного подшипника 230 левитации. Четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 может использоваться в любой из систем 200 и 300 маховика. Система 1100 маховика является вариантом системы 100 маховика, в которой нижний магнитный подшипник 130 левитации и/или верхний магнитный подшипник 230 левитации имеет форму соответствующего четырехкольцевого магнитного подшипника 1102.

Четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 содержит (а) кольцо 1110 магнитов, (б) кольцо 1120 магнитов, (с) кольцо 1130 левитации магнитов и (д) кольцо 1140 магнитов. Каждое кольцо 1110, 1120, 1130 левитации, 1140 окружает ось 190 вращения. Кольца 1110 и 1130 левитации образуют вариант магнитной структуры 134, а кольца 1120 и 1140 образуют вариант магнитной структуры 132. В одном варианте применения кольца 1110 и 1130 левитации механически соединены с дном ротора 110, а кольца 1120 и 1140 механически соединены с нижней опорой 122. В другом варианте применения кольца 1110 и 1130 левитации механически соединены с верхним концом ротора 110, а кольца 1120 и 1140 механически соединены с верхней опорой 124. Каждое из колец 1110, 1120, 1130 левитации и 1140 может содержать множество магнитов, например, как описано выше со ссылками на фиг. 4. В одном варианте каждый из этих магнитов является постоянным магнитом, а четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 выполнен с возможностью выполнять пассивную магнитную стабилизацию.

Кольцо 1120 отталкивает кольцо 1110 так, что сила, возникающая между ними, является по существу или преимущественно осевой, тем самым создавая осевую стабилизацию. Кольцо 1140 отталкивает кольцо 1130 левитации так, что сила, возникающая между ними, имеет радиальный компонент, обеспечивая радиальную стабилизацию. Сила, возникающая между кольцами 1130 левитации и 1140, далее может содержать осевой компонент и, таким образом, в дополнение к радиальной стабилизации, участвовать в осевой стабилизации. Радиальная стабилизация, обеспечиваемая магнитной связью между кольцом 1140 и кольцом 1130 левитации, может преодолеть или по меньшей мере уменьшить радиальную нестабильность, вводимую магнитной связью между кольцом 1120 и кольцом 1140.

Зазор между кольцом 1110 и кольцом 1120 может находиться в диапазоне от нескольких миллиметров до доли миллиметра. Аналогично, радиальное расстояние между кольцами 1130 левитации и 1140 может находиться в диапазоне от нескольких миллиметров до доли миллиметра. Зазор между кольцами 1110 и 1120 может задаваться так, чтобы добиться требуемой величины осевой силы между ними. Аналогично, радиальное расстояние (и также осевое расстояние) между кольцами 1130 левитации и 1140) может задаваться так, чтобы добиться требуемой величины радиальной (и также осевой) силы между ними. В одном варианте кольца 1110, 1120, 1130 левитации и 1140 выполнены так, чтобы создавать большую осевую силу, чем радиальная сила.

Кольца 1110, 1120, 1130 левитации и 1140 имеют соответствующие диаметры 1118, 1128, 1138 и

1148 и расположены на соответствующих высотах 1116, 1126, 1136 и 1146 относительно нижней опоры 122. Следует понимать, что эти высоты могут изменяться, когда ротор 110 движется относительно нижней опоры 122 и эти высоты обозначают номинальные высоты, свойственные стабильной и желаемой конфигурации системы 1100 маховика. Высота 1116 превышает высоту 1126. Диаметры 1118 и 1128 могут быть по существу идентичными, как показано на фиг. 11, или немного отличаться друг от друга. Диаметр 1148 превышает диаметр 1138, и диаметр 1148 меньше, чем диаметры 1128 и 1118. Высота 1116 превышает высоту 1136. В примере, показанном на фиг. 11, высота 1136 превышает высоту 1146, однако, не выходя за пределы объема настоящего изобретения, высоты 1136 и 1146 могут быть одинаковыми или высота 1136 может быть меньше высоты 1146.

В одном варианте (а) полярность каждого из колец 1110 и 1120 параллельна оси 190 вращения и (б) полярность каждого из колец 1130 левитации и 1140 перпендикулярна оси 190 вращения. Не выходя за пределы объема настоящего изобретения, можно применять иные направления полярности при условии, что кольца 1110 и 1120 отталкивают друг друга и кольца 1130 левитации и 1140 отталкивают друг друга. В одном примере высоты 1136 и 1146 различны, а полярностью магнитов 1132 и 1142 направлена друг к другу в направлении, проходящем под непрямым углом к оси 190 вращения.

Система 110 маховика может содержать держатель 1152, который механически соединяет кольца 1120 и 1140 с нижней опорой 122. Как показано на фиг. 11, в роторе 110 может быть сформирована канавка, окружающая ось 190 вращения, в которую выступает держатель 1152 так, чтобы поместить кольца 1110, 1120, 1130 левитации и 1140 в требуемые положения относительно друг друга. Альтернативно, ротор 110 может содержать держатель (не показан на фиг. 11), который выступает в направлении нижней опоры 122 так, чтобы поместить кольца 1110, 1120, 1130 левитации и 1140 в требуемые положения относительно друг друга. В одном варианте кольца 1110 и 1130 левитации прикреплены к держателю 1150 в или на роторе 110.

На фиг. 12-14 показаны три соответствующие конфигурации 1200, 1300 и 1400 высоты четырехкольцевого магнитного подшипника 1102 в системе 1100 маховика. Виды на каждой из фиг. 12-14 соответствуют виду на левой части фиг. 11. Фиг. 12-14 лучше всего рассматривать в сочетании с нижеследующим описанием. Конфигурации 1200, 1300 и 1400 высоты отличаются друг от друга отношением между высотой 1136 кольца 1130 левитации и высотой 1146 кольца 1140 (см. определения высот на фиг. 11). В конфигурации 1200 высоты 1136 и 1146 идентичны. В конфигурации 1300 высота 1136 превышает высоту 1146. В конфигурации 1400 высота 1136 меньше высоты 1146.

В конфигурации 1200 высот при номинальных высотах магнитная связь между кольцами 1130 левитации и 1140 соответствует чисто радиальной силе между ними. В конфигурациях 1300 и 1400 при соответствующих номинальных высотах магнитная связь между кольцами 1130 левитации и 1140 создает и радиальную, и осевую силу между ними. В конфигурации 1300 при номинальных высотах осевая сила соответствует направленной вверх силе, действующей на ротор 110 в направлении от нижней опоры 122. Таким образом, при номинальных высотах в конфигурации 1300 высот осевая сила между кольцами 1130 и 1140 дополнительно участвует в осевой стабилизации, обеспечиваемой магнитной связью между кольцами 1110 и 1120. Наоборот, при номинальных высотах в конфигурации 1400 высот осевая сила между кольцами 1130 и 1140 сдвигает ротор 11 к нижней опоре 122 и поэтому работает против осевой силы, создаваемой магнитной связью между кольцами 1110 и 1120. При работе на систему 1100 маховика может воздействовать осевое движение среды, например фундамента 180, и отношение между высотами 1136 и 1146 может динамически изменяться в результате такого осевого движения.

По тем же причинам, что были описаны со ссылками на фиг. 6-8, конфигурации 1200, 1300 и 1400 высот имеют свойства стабильности, аналогичные конфигурациям 600, 700 и 800.

Тогда как кольца 410 и 430 в четырехкольцевом магнитном подшипнике 400 левитации находятся в непосредственной близости друг к другу, в четырехкольцевом магнитном подшипнике левитации 1102 в непосредственной близости друг к другу находятся кольца 1120 и 1140. Каждая из конфигураций 900 и 1000 полярности, описанных выше со ссылками на фиг. 9 и 10, может быть перенесена на кольца 1120 и 1130 четырехкольцевого магнитного подшипника 1102 левитации.

Фиг. 15 иллюстрирует одну систему 1500 маховика, имеющую (а) неподвижный вал, (б) по меньшей мере один магнитный подшипник левитации для левитации ротора с радиальной стабилизацией и (с) другие магнитные модули, установленные на неподвижном валу на расстоянии по меньшей мере от одного магнитного подшипника левитации.

Система 1500 маховика является вариантом системы 300 маховика, которая содержит по меньшей мере один генератор 1510, по меньшей мере один активный магнитный подшипник 1530 и по меньшей мере один пассивный магнитный резервный подшипник 1520. Система 1500 маховика далее может включать один или более активный вертикально стабилизирующий магнитный подшипник 1540.

В системе 1500 маховика нижний магнитный подшипник 130 левитации отнесен от отверстия 312 и неподвижного вала 326. В некоторых вариантах система 1500 маховика также содержит верхний магнитный подшипник 230 левитации, отнесенный от отверстия 312 и неподвижного вала 326. Каждый по меньшей мере из одного генератора 1510, по меньшей мере одного активного магнитного подшипника 1530, по меньшей мере одного пассивного магнитного резервного подшипника 1520 и, если имеется, од-

ного или более активного вертикально стабилизирующего магнитного подшипника 1540 расположен у неподвижного вала 326 так, чтобы минимизировать (а) присутствие внешних магнитных полей на нижнем магнитном подшипнике 130 левитации (и, если имеется, на верхнем магнитном подшипнике 230 левитации) и/или (b) потребность в магнитном экранировании для уменьшения таких внешних магнитных полей.

На фиг. 15 показаны один генератор 1510, два активных магнитных подшипника 1530 и два пассивных резервных магнитных подшипника. Однако, не выходя за пределы объема настоящего изобретения, система 1500 маховика может содержать другое количество любого из генератора 1510, активного магнитного подшипника 1530 и пассивного магнитного резервного подшипника 1520. Аналогично, в вариантах системы 1500 маховика, в которых применяется один или более активный вертикально стабилизирующий магнитный подшипник 1540, количество активных вертикально стабилизирующих магнитных подшипников 1540 может отличаться от показанного на фиг. 15, не выходя за пределы объема настоящего изобретения.

Каждый генератор 1510 магнитным способом преобразует энергию вращения ротора 310 в электрическую энергию, выводимую из системы 1500 маховика, и, наоборот, магнитным способом преобразует электроэнергию, подаваемую на систему 1500 маховика в энергию вращения ротора 310. Генератор 1510 может содержать (i) множество постоянных магнитов 1514, механически соединенных с ротором 310, и (ii) статор 1512 генератора, механически соединенный с неподвижным валом 326. Статор 1512 генератора имеет магнитную связь с постоянными магнитами 1514 для преобразования энергии вращения ротора 310 в электрический ток в обмотках статора 1512 генератора, и наоборот.

Активный магнитный подшипник (подшипники) 1530 активно стабилизирует положение ротора 310 относительно держателя 320. Каждый активный магнитный подшипник 1530 может содержать (i) множество намагничиваемых элементов 1534, механически соединенных с ротором 310, и (ii) множество электромагнитов 1532, механически соединенных с неподвижным валом 326.

Электромагниты 1532 имеют магнитную связь с намагничиваемыми элементами 1534 для активной стабилизации ротора 310 относительно держателя 320. Каждый активный магнитный подшипник 1530 далее может содержать один или более датчик 1536, который определяет положение и/или движение ротора 310 для выдачи активного сигнала обратной связи на электромагниты 1532.

Пассивный магнитный резервный подшипник (подшипники) 1520 обеспечивает стабилизацию ротора 310 в случае отказа активного магнитного подшипника (подшипников) 1530. Каждый пассивный магнитный резервный подшипник 1520 содержит (i) множество постоянных магнитов 1524, механически соединенных с ротором 310, и (ii) множество постоянных магнитов 1522, имеющих магнитную связь с постоянными магнитами 1524 для обеспечения резервной стабилизации ротора 310 относительно держателя 320, если один или более из активных магнитных подшипников 1530 потеряет питание или произойдет другой отказ.

В одном варианте один пассивный резервный магнитный подшипник 1520 расположен рядом с нижней опорой 322. В этом варианте положение пассивного магнитного резервного подшипника 1520 на неподвижном валу 326 и радиально внутри от нижнего магнитного подшипника 130 левитации уменьшает магнитную интерференцию между этими двумя магнитными модулями. В другом варианте один пассивный магнитный резервный подшипник 1520 расположен рядом с верхней опорой 324 и система 1500 маховика содержит верхний магнитный подшипник 230 левитации. В этом варианте положение пассивного магнитного резервного подшипника 1620 на неподвижном валу 326 и радиально внутри от верхнего магнитного подшипника 230 левитации уменьшает магнитную интерференцию между этими двумя магнитными модулями.

Активный вертикально стабилизирующий магнитный подшипник (подшипники) 1540 обеспечивают активную стабилизацию осевого положения ротора 310 относительно держателя 320. Каждый активный вертикально стабилизирующий магнитный подшипник 1540 может содержать (i) множество постоянных магнитов 1544, механически соединенных с ротором 310, и (ii) множество электромагнитов 1542, механически соединенных с неподвижным валом 326.

Электромагниты 1542 имеют магнитную связь с постоянными магнитами 1544 для активной стабилизации осевого положения ротора 310 относительно держателя 320. Каждый активный вертикально стабилизирующий магнитный подшипник 1540 может далее содержать один или более датчик (не показаны на фиг. 15), который определяет положения и/или движение ротора 310 для выдачи активного сигнала обратной связи на электромагниты 1542.

Фиг. 16 иллюстрирует способ 1600 левитации и радиальной стабилизации ротора системы маховика, такой как система 500 маховика или система 1100 маховика. Способ 1600 содержит этапы 1610 и 1620. На этапе 1610 пассивно прилагают направленную вверх магнитную силу к множеству первых магнитов, механически соединенных с ротором, для принятия по меньшей мере части гравитационной нагрузки ротора. Этап 1610 можно выполнять, используя четырехкольцевой магнитный подшипник 400 левитации как нижний магнитный подшипник 130 левитации. В одном примере этапа 1610 кольцо 420 прилагает направленную вверх магнитную силу к кольцу 410, как описано выше со ссылками на фиг. 4 и 5. Альтернативно, этап 1610 можно выполнять, используя в качестве нижнего магнитного под-

шипника 130 левитации четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 левитации. В одном варианте этапа 1610 кольцо 1120 прилагает направленную вверх силу к кольцу 1110, как описано выше со ссылками на фиг. 11. На этапе 1620 пассивно прилагают направленную радиально внутрь силу к множеству вторых магнитов, механически соединенных с ротором, чтобы по меньшей мере уменьшить радиальное децентрирование ротора. Этап 1620 можно выполнять, используя в качестве нижнего магнитного подшипника 130 левитации четырехкольцевой магнитный подшипник 400 левитации. В одном варианте этапа 1620 кольцо 440 прилагает направленную внутрь радиальную силу к кольцу 430, как описано выше со ссылками на фиг. 4 и 5. Альтернативно, этап 1620 можно выполнять, используя в качестве нижнего магнитного подшипника 130 левитации четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 левитации. В одном примере этапа 1620 кольцо 1140 прилагает направленную радиально внутрь силу к кольцу 1130, как описано выше со ссылками на фиг. 11.

В одном варианте способ 1600 далее содержит этап 1630, на котором ко вторым магнитам пассивно прилагают вторую направленную вверх магнитную силу.

Этап 1630 может выполняться с помощью четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации, используемого как нижний магнитный подшипник 130 левитации. В одном примере этапа 1630 кольцо 440 прилагает направленную вверх осевую силу к кольцу 430, например, как описано выше со ссылками на фиг. 7. Альтернативно, этап 1630 можно выполнять, используя в качестве нижнего магнитного подшипника 130 левитации четырехкольцевой магнитный подшипник 1102 левитации. В одном примере этапа 1630 кольцо 1140 прилагает направленную вверх осевую силу к кольцу 1130, например, как описано выше со ссылками на фиг. 13.

При необходимости, способ 1600 содержит генерирование направленной вертикально вверх магнитной силы и направленной радиально внутрь магнитной силы (на этапах 1610, 1620 и, при необходимости, 1630) по меньшей мере частично через магнитную связь между (а) сборкой постоянных магнитов, механически соединенной с опорой под ротором, и (б) первыми и вторыми магнитами. Например, кольца 410 и 430 могут иметь магнитную связь друг с другом, как описано выше со ссылками на фиг. 9, или кольца 1120 и 1140 могут иметь магнитную связь друг с другом, как описано выше.

В некоторых вариантах способ 1600 далее содержит этапы 1640 и 1650, на которых пассивно прилагают направленную вниз магнитную силу к множеству третьих магнитов, механически соединенных с ротором, для ограничения направленного вверх движения ротора. Этап 1640 может выполняться с использованием четырехкольцевого магнитного подшипника левитации, применяемого как верхний магнитный подшипник 230 левитации. В одном примере этапа 1640 кольцо 420 прилагает направленную вниз магнитную силу к кольцу 410, как описано выше со ссылками на фиг. 4 и 5. Альтернативно, этап 1640 может выполняться с использованием четырехкольцевого магнитного подшипника 1102 левитации, применяемого как верхний магнитный подшипник 230 левитации. В одном примере этапа 1640 кольцо 1120 прилагает направленную вниз силу к кольцу 1110, как описано выше со ссылками на фиг. 11. На этапе 1650 пассивно прилагают направленную радиально внутрь силу к множеству четвертых магнитов, механически соединенных с ротором, для участия в уменьшении радиального децентрирования ротора. Этап 1650 может выполняться с применением четырехкольцевого магнитного подшипника 1102 левитации, используемого как верхний магнитный подшипник 230 левитации. В одном примере этапа 1650 кольцо 1140 прилагает направленную радиально внутрь силу к кольцу 1130, как описано выше со ссылками на фиг. 11.

Варианты способа, содержащие этапы 1640 и 1650, могут содержать этап 1660, на котором пассивно прилагают вторую направленную вниз магнитную силу к четвертым магнитам. Этап 1660 можно выполнять с применением четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации, используемого как верхний магнитный подшипник 230 левитации. В одном примере этапа 1660 кольцо 440 прилагает направленную вниз осевую силу к кольцу 430, например, как описано выше со ссылками на фиг. 7. Альтернативно, этап 1660 можно выполнять с применением четырехкольцевого магнитного подшипника 1102 левитации, используемого как верхний магнитный подшипник 230 левитации. В одном примере этапа 1660 кольцо 1140 прилагает направленную вниз осевую силу к кольцу 1130, например, как описано выше со ссылками на фиг. 13.

Пример I. Стабильность 300-килограммового ротора.

В этом примере были рассчитаны осевые и радиальные силы для вариантов четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации, предназначенного для левитации 300-килограммового варианта ротора 110. Результаты показаны на фиг. 17. Диаграммы 1720 и 1722 относятся к варианту четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации с конфигурацией 700 высот. Диаграммы 1730 и 1732 относятся к варианту четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации с конфигурацией 800 высот. Диаграммы 1710 и 1712 относятся к варианту четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации без колец 430 и 440.

На каждой из диаграмм 1710, 1720, 1730 показана направленная вверх осевая сила как функция осевого положения ротора 110. На каждой из диаграмм 1712, 1722 и 1732 показана радиальная сила как функция расстояния радиального децентрирования для множества осевых положений ротора 110. Положительная величина радиальной силы соответствует направленной наружу, т.е., децентрирующей ради-

альной силе.

Принимая первые диаграммы 1710 и 1712 за точку отчета, магнитный подшипник левитации, работающий только в осевом направлении, создает стабильную направленную вверх силу, величина которой увеличивается по мере падения ротора 100, что является желательным результатом (см. диаграмму 1710). Однако сила, направленная радиально наружу, имеет существенную величину. Даже небольшое отклонение от радиального центрирования приводит к воздействию на ротор большой направленной наружу радиальной силы. Это является нежелательной радиальной нестабильностью, которой должен противодействовать активный магнитный подшипник.

Далее, для варианта четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации с конфигурацией 700 высот диаграмма 1720 показывает стабильную направленную вверх осевую силу, величина которой увеличивается по мере падения ротора 110, что является желательным результатом. Диаграмма 1722 показывает направленную радиально наружу силу, которая существенно меньше показанной на диаграмме 1712. Это - демонстрация улучшенной стабильности, создаваемой этим вариантом четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации. Поскольку направленные радиально наружу силы на диаграмме 1722 существенно меньше, чем показаны на диаграмме 1712, этим силам значительно легче противодействовать, и система маховика вследствие этого будет более энергетически эффективна.

Наконец, для варианта четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации с конфигурацией 800 высот диаграмма 1730 показывает нестабильную направленную вверх осевую силу, которая уменьшается по величине, когда ротор 110 падает ниже определенной высоты. Это может быть менее желательным, чем поведение, показанное на диаграмме 1720. Диаграмма 1732 показывает радиальные силы с величиной, подобной показанной на диаграмме 1722, с той разницей, что радиальная сила на диаграмме 1732 становится направленной радиально внутрь на наименьших высотах

Пример II. Стабильность 1500-килограммового ротора.

В этом примере рассчитывались осевые и радиальные силы для варианта четырехкольцевого магнитного подшипника 400 левитации, предназначенного для левитации 1500-килограммового варианта ротора 110. Рассматриваемый здесь вариант имеет конфигурацию 700 высот. Результаты показаны на фиг. 18. Диаграмма 1810 показывает направленную вверх осевую силу как функцию осевого положения ротора 110 для множества радиально децентрирующих расстояний ротора 110. Диаграмма 1812 показывает радиальную силу как функцию расстояния радиального децентрирования для множества осевых положений ротора 110. Положительная величина радиальной силы соответствует радиальной силе, направленной наружу, т.е. децентрирующей. Поведение, наблюдаемое на диаграммах 1810 и 1812, подобно тому, что наблюдается на диаграммах 1720 и 1722, за исключением того, что эти диаграммы масштабированы для значительно больших величин силы в результате большей массы ротора 110.

Комбинация признаков.

Признаки, описанные выше и заявленные в приложенной формуле, можно комбинировать разными способами, не выходя за пределы объема настоящего изобретения. Например, следует понимать, что аспекты системы маховика или сопутствующего способа, описанные выше, могут содержать признаки или обмениваться признаками с другой системой маховика или сопутствующего способа, описанных выше. Нижеследующие примеры иллюстрируют возможные, не ограничивающие комбинации вариантов, описанных выше. Следует понимать, что в описанные способ и устройство могут быть внесены многие другие изменения и замены, не выходя за пределы объема настоящего изобретения.

(A1) Одна система маховика содержит (a) держатель, включающий нижнюю опору, (b) ротор, характеризующийся гравитационной нагрузкой и выполненный с возможностью вращения над нижней опорой вокруг оси вращения, и (c) нижний магнитный подшипник левитации. Нижняя магнитная система левитации содержит (i) кольцо первых магнитов, механически соединенных с нижним концом ротора, (ii) кольцо вторых магнитов, механически соединенных с нижней опорой под кольцом первых магнитов, при этом вторые магниты отталкивают первые магниты для магнитной поддержки по меньшей мере части гравитационной нагрузки над нижней опорой, и (iii) кольцо третьих магнитов, механически соединенных с нижним концом, и (iv) кольцо четвертых магнитов, механически соединенных с нижней опорой радиально снаружи кольца третьих магнитов, где четвертые магниты отталкивают третьи магниты по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора относительно держателя.

(A2) В системе маховика, обозначенной (A1), каждый из первых магнитов, каждый из вторых магнитов, каждый из третьих магнитов и каждый из четвертых магнитов может быть постоянным магнитом.

(A3) В любой из систем маховика, обозначенных (A1) и (A2), магнитное поле каждого из первых и вторых магнитов может быть выровнено параллельно оси вращения.

(A4) В системе маховика, обозначенной (A3), магнитное поле каждого из третьих и четвертых магнитов может быть выровнено ортогонально оси вращения.

(A5) В любой из систем маховика, обозначенных (A1)-(A4), первые, вторые, третьи и четвертые магниты могут быть расположены на соответствующих первой второй, третьей и четвертой высотах над нижней опорой, при этом первая высота превышает вторую высоту, а третья высота превышает четвертую высоту.

(A6) В системе маховика, обозначенной (A5), магнитная связь между третьими магнитами и четвер-

тыми магнитами может дополнительно участвовать в поддержке по меньшей мере части гравитационной нагрузки.

(A7) в любой из систем маховика, обозначенных (A5) и (A6), первые, вторые, третьи и четвертые магниты расположены на соответствующих первом, втором третьем и четвертом диаметрах относительно оси вращения, при этом третий диаметр превышает первый и второй диаметры, а четвертый диаметр превышает третий диаметр.

(A8) В системе маховика, обозначенной (A7), первый и второй диаметры могут быть идентичными.

(A9) В любой из систем маховика, обозначенных (A7) и (A8), третья высота может превышать первую высоту.

(A10) В системе маховика, обозначенной (A9), магнитное поле первых магнитов может быть выровнено параллельно оси вращения, магнитное поле третьих магнитов может быть выровнено ортогонально оси вращения, каждый из первых магнитов может иметь верхний полюс и нижний полюс, и каждый из третьих магнитов может иметь внутренний полюс и внешний полюс так, что для каждой пары одного ближайшего из первых магнитов и одного ближайшего из третьих магнитов внутренний полюс находился ближе к верхнему полюсу, чем к нижнему полюсу, а верхний полюс находился ближе к внутреннему полюсу, чем к внешнему полюсу, при этом каждый из внутреннего полюса и нижнего полюса является одним из северного и южного полюса, а каждый из внешнего полюса и верхнего полюса является другим из северного полюса и южного полюса.

(A11) В системе маховика, обозначенной (A10), для каждой из пар ближайших магнитов магнитное поле первого магнита и магнитное поле третьего магнита могут быть взаимосвязаны.

(A12) В любой из систем маховика, обозначенных (A1)-(A6), первые, вторые третьи и четвертые магниты могут быть расположены на соответствующих первом, втором, третьем и четвертом диаметрах относительно оси вращения и четвертый диаметр может быть меньше первого и второго диаметров а третий диаметр может быть меньше четвертого диаметра.

(A13) В системе маховика, обозначенной (A12), первый и второй диаметры могут быть идентичны.

(A14) В любой из систем маховика, обозначенных (A11)-(A13), вторая высота может превышать четвертую высоту.

(A15) В системе маховика, обозначенной (A14), магнитное поле вторых магнитов может быть выровнено параллельно оси вращения, магнитное поле четвертых магнитов может быть выровнено ортогонально оси вращения, каждый из вторых магнитов может иметь верхний полюс и нижний полюс, а каждый из четвертых магнитов может иметь внутренний полюс и внешний полюс так, чтобы для каждой пары одного ближайшего из вторых магнитов и одного ближайшего из четвертых магнитов внутренний полюс находился ближе к верхнему полюсу, чем к нижнему полюсу, а верхний полюс находился ближе к внутреннему полюсу, чем к внешнему полюсу, при этом каждый из внутреннего полюса и нижнего полюса является одним из северного и южного полюсов, а каждый из внешнего полюса и верхнего полюса является другим из северного полюса и южного полюса.

(A16) В системе маховика, обозначенной (A15), для каждой из пар ближайших магнитов второй магнит и четвертый магнит могут иметь магнитную связь друг с другом.

(A17) Любая из систем маховика, обозначенных как (A1)-(A16), далее может содержать верхнюю опору, выполненную в держателе, и верхний магнитный подшипник левитации, который содержит (i) кольцо пятых магнитов, механически соединенных с верхним концом ротора, (ii) кольцо шестых магнитов, механически соединенных с верхней опорой над кольцом пятых магнитов, при этом шестые магниты отталкивают пятые магниты для ограничения направленного вверх движения ротора над нижней опорой, (iii) кольцо седьмых магнитов, механически соединенных с верхним концом, и (iv) кольцо восьмых магнитов, механически соединенных с верхней опорой радиально снаружи от кольца седьмых магнитов, при этом восьмые магниты отталкивают седьмые магниты, магнитная связь между седьмыми магнитами и восьмыми магнитами взаимодействует с магнитной связью между третьими магнитами и четвертыми магнитами по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора.

(A18) В системе маховика, обозначенной (A17), пятые, шестые, седьмые и восьмые магниты могут быть расположены соответственно на пятой, шестой, седьмой и восьмой высотах над нижней опорой, при этом шестая высота превышает пятую высоту, а восьмая высота превышает седьмую высоту.

(A19) В системе маховика, обозначенной (A18), пятые, шестые, седьмые и восьмые магниты далее могут участвовать в ограничении направленного вверх движения ротора.

(A20) Любая из систем маховика, обозначенных (A1)-(A19), далее может содержать (a) генератор, содержащий (i) множество первых постоянных магнитов, механически соединенных с ротором, и (ii) статор генератора, механически соединенный с держателем и выполненный с возможностью взаимодействовать с первыми постоянными магнитами для преобразования энергии вращения ротора в электрический ток в обмотках статора генератора, и наоборот; (b) активный магнитный подшипник, содержащий (i) множество намагничиваемых элементов, механически соединенных с ротором, и (ii) множество электромагнитов, механически соединенных с держателем и выполненных с возможностью создания магнитной связи с множеством намагничиваемых элементов для активной стабилизации ротора относительно держателя; и (c) пассивный магнитный резервный подшипник, содержащий (i) множество вторых

постоянных магнитов, механически соединенных с ротором, и (ii) множество третьих постоянных магнитов, механически соединенных с держателем и выполненных с возможностью магнитной связи со вторыми постоянными магнитами для резервной стабилизации ротора относительно держателя в случае отката активного магнитного подшипника.

(A21) В системе маховика, обозначенной (A20), пассивный магнитный резервный подшипник может находиться радиально внутри нижнего магнитного подшипника левитации, а нижний магнитный подшипник левитации может находиться дальше от генератора, чем пассивный магнитный резервный подшипник.

(A22) В системе маховика, обозначенной (A21), ротор может формировать отверстие, держатель может далее содержать вал, проходящий в этом отверстии и соединяющий верхнюю опору с нижней опорой, ротор может быть выполнен с возможностью вращения вокруг вала, каждый из генератора и активного магнитного подшипника может быть выполнен в валу, активный магнитный подшипник может находиться ближе к нижней опоре, чем генератор, и пассивный магнитный резервный подшипник может находиться ближе к нижней опоре, чем активный магнитный подшипник.

(B1) Один способ левитации и радиальной стабилизации ротора системы маховика, содержит этапы, на которых (a) пассивно прилагают направленную вверх магнитную силу к множеству первых магнитов, механически соединенных с ротором, для принятых по меньшей мере части гравитационной нагрузки ротора, и (b) пассивно прилагают направленную внутрь радиальную силу к множеству вторых магнитов, механически соединенных с ротором, по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора.

(B2) Способ, обозначенный (B2), далее содержащий этап, на котором пассивно прилагают вторую направленную вверх магнитную силу ко вторым магнитам.

(B3) Любой из способов, обозначенных (B1) и (B2), может содержать этап, на котором генерируют направленную вертикально вверх магнитную силу и направленную радиально внутрь магнитную силу, по меньшей мере частично через магнитную связь между (i) сборкой постоянных магнитов, механически соединенных с опорой под ротором, и (ii) первыми и вторыми магнитами.

(B4) Любой из способов, обозначенных (B1)-(B3), далее может содержать этап, на котором пассивно прилагают направленную вниз магнитную силу к множеству третьих магнитов, механически соединенных с ротором, для ограничения направленного вверх движения ротора и пассивно прилагают направленную внутрь силу к множеству четвертых магнитов, механически соединенных с ротором, для участия в уменьшении радиального децентрирования ротора.

(B5) Способ, обозначенный (B4), далее может содержать этап, на котором пассивно прилагают вторую направленную вниз магнитную силу к четвертым магнитам.

В вышеописанные системы и способы можно вносить изменения, не выходящие за пределы объема настоящего изобретения. Следует отметить, что объект вышеприведенного описания и приложенных чертежей следует толковать как иллюстративный и не несущий ограничивающего смысла. Приложенная формула охватывает родовые и конкретные признаки и все определения объема описанных систем и способов.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система (100, 500) маховика, содержащая:
 держатель, включающий нижнюю опору (122);
 ротор (110, 310), характеризующийся гравитационной нагрузкой и выполненный с возможностью вращения над нижней опорой вокруг оси вращения (190); и
 нижний магнитный подшипник (130) левитации, включающий:
 кольцо (410) первых постоянных магнитов (412), механически соединенных с нижним концом ротора;
 кольцо (420) вторых постоянных магнитов (422), механически соединенных с нижней опорой под кольцом первых магнитов, при этом вторые постоянные магниты отталкивают первые постоянные магниты для магнитной поддержки по меньшей мере части гравитационной нагрузки над нижней опорой;
 кольцо (430) третьих постоянных магнитов (432), механически соединенных с нижним концом ротора; и
 кольцо (440) четвертых постоянных магнитов (442), механически соединенных с нижней опорой радиально снаружи кольца третьих постоянных магнитов, при этом четвертые постоянные магниты отталкивают третьи постоянные магниты по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора относительно держателя,
 при этом магнитное поле каждого из первых и вторых постоянных магнитов выровнено параллельно оси вращения (190) и магнитное поле каждого из третьих и четвертых постоянных магнитов выровнено ортогонально оси вращения.

2. Система по п.1, в которой первые, вторые, третьи и четвертые постоянные магниты расположены на соответствующих первой (516), второй (526), третьей (536) и четвертой (546) высотах над нижней

опорой, при этом первая высота превышает вторую высоту, а третья высота превышает четвертую высоту и магнитная связь между третьими постоянными магнитами и четвертыми постоянными магнитами дополнительно участвует в поддержке по меньшей мере части гравитационной нагрузки.

3. Система по п.1, в которой первые, вторые, третьи и четвертые постоянные магниты расположены на соответствующих первом (518), втором (528), третьем (538) и четвертом (548) диаметрах относительно оси вращения, при этом третий диаметр превышает первый и второй диаметры, а четвертый диаметр превышает третий диаметр.

4. Система по п.3, в которой магнитное поле первых постоянных магнитов выровнено параллельно оси вращения, магнитное поле третьих постоянных магнитов выровнено ортогонально оси вращения, каждый из первых постоянных магнитов имеет верхний полюс и нижний полюс и каждый из третьих постоянных магнитов имеет внутренний полюс и внешний полюс так, что для каждой из ближайших соседних пар из одного из первых постоянных магнитов и одного из третьих магнитов (а) внутренний полюс находится ближе к верхнему полюсу, чем к нижнему полюсу, (b) верхний полюс находится ближе к внутреннему полюсу, чем к внешнему полюсу, при этом каждый из внутреннего полюса и нижнего полюса является одним из северного и южного полюсов и каждый из внешнего полюса и верхнего полюса является другим из северного полюса и южного полюса, и для каждой из ближайших соседних пар магнитное поле первого постоянного магнита и магнитное поле третьего постоянного магнита взаимосвязаны.

5. Система по п.4, в которой первый и второй диаметры идентичны и вторая высота превышает четвертую высоту.

6. Система по п.4, в которой магнитное поле вторых постоянных магнитов выровнено параллельно оси вращения, магнитное поле четвертых постоянных магнитов выровнено ортогонально оси вращения, каждый из вторых постоянных магнитов имеет верхний полюс и нижний полюс и каждый из четвертых магнитов имеет внутренний полюс и внешний полюс так, чтобы для каждой из ближайших соседних пар из одного из вторых постоянных магнитов и одного из четвертых постоянных магнитов (а) внутренний полюс находился ближе к верхнему полюсу, чем к нижнему полюсу, (b) верхний полюс находился ближе к внутреннему полюсу, чем к внешнему полюсу, при этом каждый из внутреннего полюса и нижнего полюса является одним из северного и южного полюсов и каждый из внешнего полюса и верхнего полюса является другим из северного полюса и южного полюса.

7. Система по п.6, в которой для каждой из ближайших соседних пар второй постоянный магнит и четвертый постоянный магнит имеют магнитную связь друг с другом.

8. Система по п.1, далее содержащая:
 верхнюю опору (124), выполненную в держателе; и
 верхний магнитный подшипник (230) левитации, включающий:
 кольцо пятых магнитов, механически соединенных с верхним концом ротора,
 кольцо шестых магнитов, механически соединенных с верхней опорой над кольцом пятых магнитов, при этом шестые магниты отталкивают пятые магниты для ограничения направленного вверх движения ротора над нижней опорой,
 кольцо седьмых магнитов, механически соединенных с верхним концом, и
 кольцо восьмых магнитов, механически соединенных с верхней опорой радиально снаружи от кольца седьмых магнитов, при этом восьмые магниты отталкивают седьмые магниты и магнитная связь между седьмыми магнитами и восьмыми магнитами взаимодействует с магнитной связью между третьими магнитами и четвертыми магнитами по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора.

9. Система по п.8, в которой пятые, шестые, седьмые и восьмые магниты расположены соответственно на пятой, шестой, седьмой и восьмой высотах над нижней опорой, причем шестая высота превышает пятую высоту и восьмая высота превышает седьмую высоту, при этом магнитная связь между седьмыми и восьмыми магнитами дополнительно участвует в ограничении направленного вверх движения ротора.

10. Система по п.1, далее содержащая:
 генератор (1510), включающий:
 множество первых постоянных магнитов (1514) генератора, механически соединенных с ротором (310), и
 статор (1512) генератора, механически соединенный с держателем и выполненный с возможностью взаимодействовать с первыми постоянными магнитами генератора для преобразования энергии вращения ротора в электрический ток в обмотках статора генератора, и наоборот;
 активный магнитный подшипник (1530), включающий:
 множество намагничиваемых элементов (1534), механически соединенных с ротором (310), и
 множество электромагнитов (1532), механически соединенных с держателем и выполненных с возможностью создания магнитной связи с множеством намагничиваемых элементов для активной стабилизации ротора относительно держателя; а также
 пассивный магнитный резервный подшипник (1520), содержащий;

множество первых постоянных магнитов (1524) пассивного магнитного резервного подшипника, механически соединенных с ротором, и

множество вторых постоянных магнитов (1522) пассивного магнитного резервного подшипника, механически соединенных с держателем и выполненных с возможностью магнитной связи с первыми постоянными магнитами пассивного магнитного резервного подшипника для резервной стабилизации ротора относительно держателя в случае отказа активного магнитного подшипника.

11. Система по п.10, в которой ротор формирует отверстие (312), при этом держатель далее содержит вал (326), проходящий в этом отверстии и соединяющий верхнюю опору с нижней опорой, ротор выполнен с возможностью вращения вокруг вала, каждый из генератора и активного магнитного подшипника предусмотрен в валу, активный магнитный подшипник находится ближе к нижней опоре, чем генератор, и пассивный магнитный резервный подшипник находится ближе к нижней опоре, чем активный магнитный подшипник.

12. Способ левитации и радиальной стабилизации ротора системы маховика по п.1, при этом способ содержит этапы, на которых:

пассивно прилагают направленную вверх магнитную силу к множеству первых магнитов, механически соединенных с ротором, для принятия по меньшей мере части гравитационной нагрузки ротора; и

пассивно прилагают направленную внутрь радиальную силу к множеству вторых магнитов, механически соединенных с ротором, по меньшей мере для уменьшения радиального децентрирования ротора, и

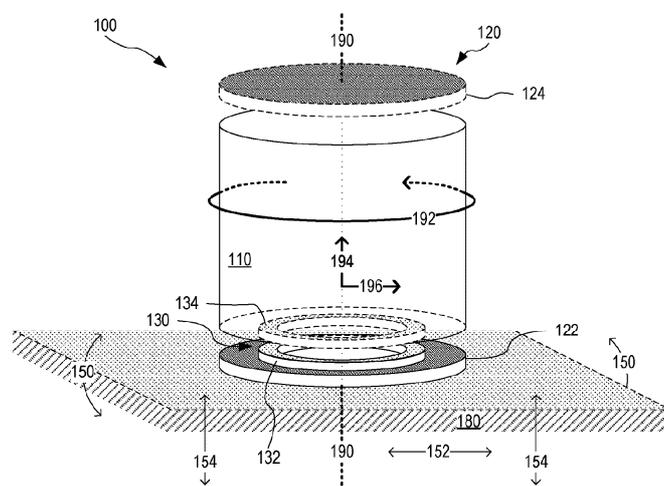
пассивно прилагают вторую направленную вверх магнитную силу ко вторым магнитам.

13. Способ по п.12, содержащий этап, на котором генерируют направленную вертикально вверх магнитную силу и направленную радиально внутрь магнитную силу по меньшей мере частично через магнитную связь между (а) сборкой постоянных магнитов, механически соединенных с опорой под ротором, и (b) первыми и вторыми магнитами.

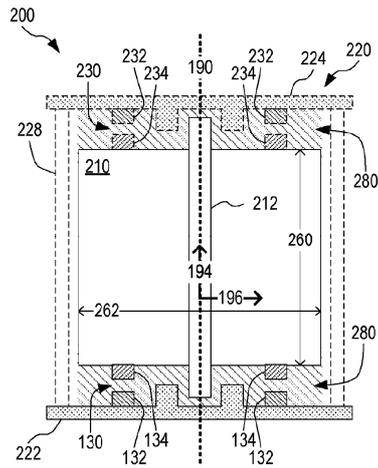
14. Способ по п.12, далее содержащий этапы, на которых: пассивно прилагают направленную вниз магнитную силу к множеству третьих магнитов, механически соединенных с ротором, для ограничения направленного вверх движения ротора,

пассивно прилагают направленную радиально внутрь силу к множеству четвертых магнитов, механически соединенных с ротором, для участия в уменьшении радиального децентрирования ротора,

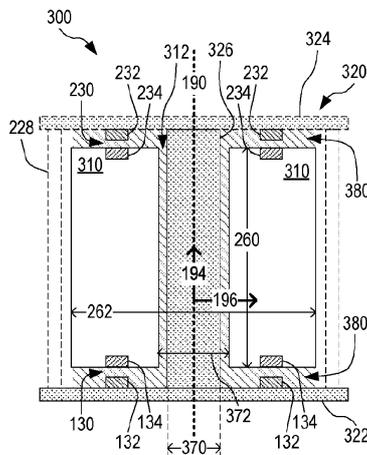
пассивно прилагают вторую направленную вниз магнитную силу к четвертым магнитам.



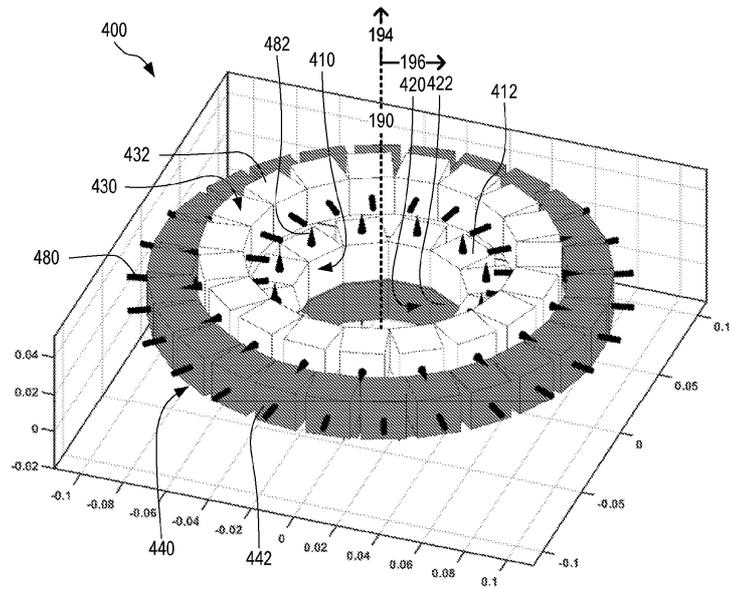
Фиг. 1



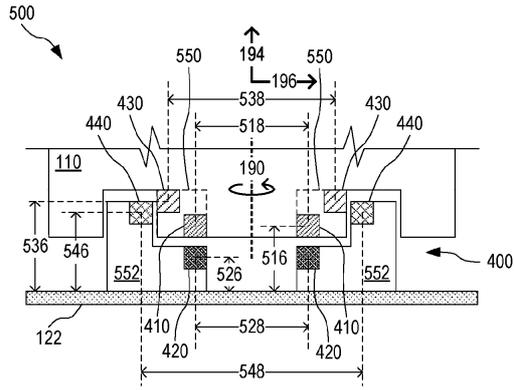
Фиг. 2



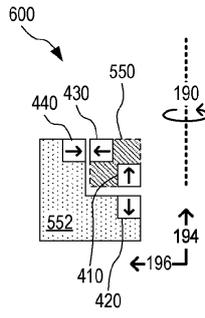
Фиг. 3



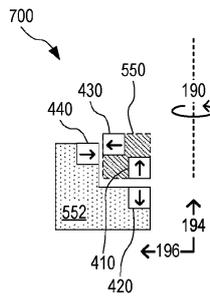
Фиг. 4



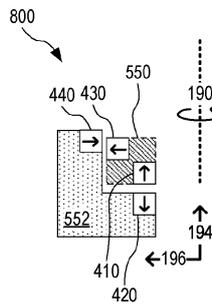
Фиг. 5



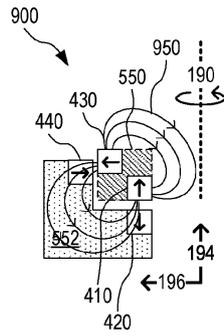
Фиг. 6



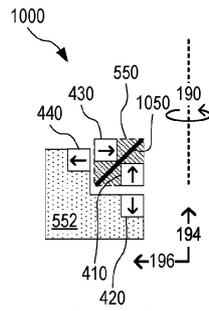
Фиг. 7



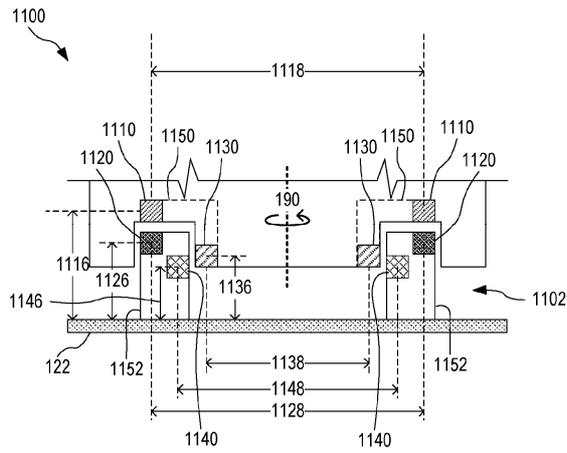
Фиг. 8



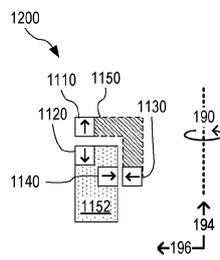
Фиг. 9



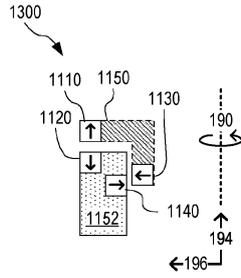
Фиг. 10



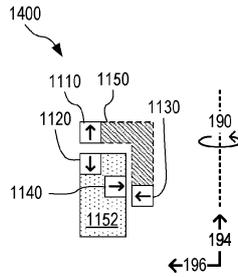
Фиг. 11



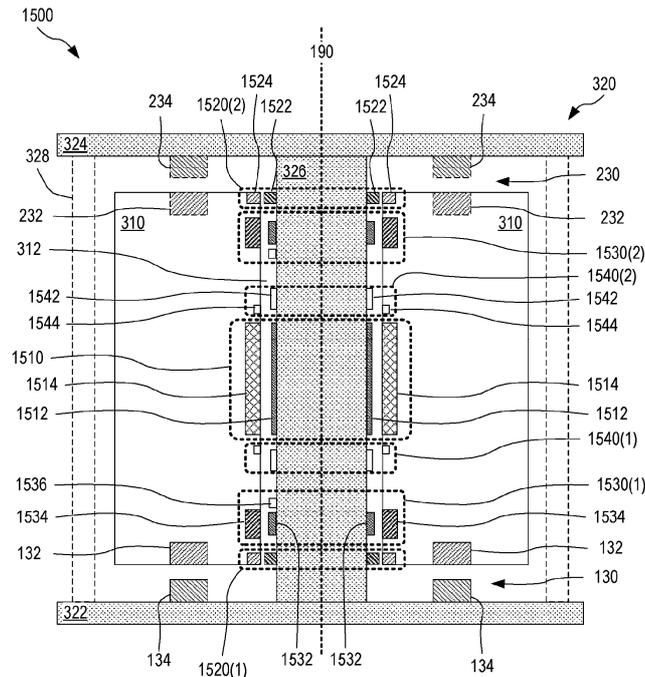
Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14



Фиг. 15

1600

ПАССИВНО ПРИЛОЖИТЬ НАПРАВЛЕННУЮ ВВЕРХ МАГНИТНУЮ СИЛУ КО МНОЖЕСТВУ ПЕРВЫХ МАГНИТОВ, МЕХАНИЧЕСКИ СОЕДИНЕННЫХ С РОТОРОМ ДЛЯ ПРИНЯТЬСЯ ПО МЕНЬШЕЙ МЕРЕ ЧАСТИ ГРАВИТАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ РОТОРА
1610

ПАССИВНО ПРИЛОЖИТЬ НАПРАВЛЕННУЮ РАДИАЛЬНО ВНУТРЕЬ СИЛУ КО МНОЖЕСТВУ ВТОРЫХ МАГНИТОВ, МЕХАНИЧЕСКИ СОЕДИНЕННЫХ С РОТОРОМ ДЛЯ ПО МЕНЬШЕЙ МЕРЕ СНИЖЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ДЕЦЕНТРИРОВАНИЯ РОТОРА
1620

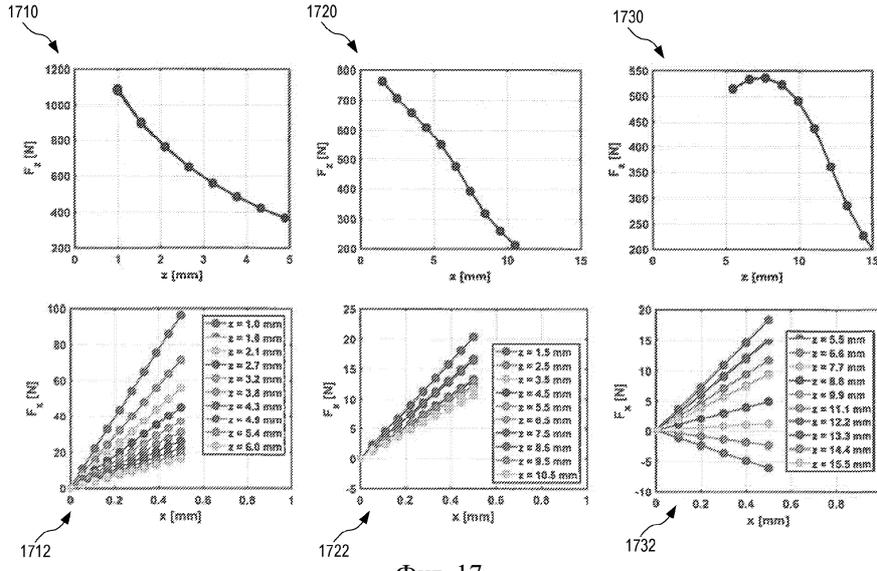
ПАССИВНО ПРИЛОЖИТЬ ВТОРУЮ НАПРАВЛЕННУЮ ВВЕРХ МАГНИТНУЮ СИЛУ КО ВТОРЫМ МАГНИТАМ.
1630

ПАССИВНО ПРИЛОЖИТЬ НАПРАВЛЕННУЮ ВНИЗ МАГНИТНУЮ СИЛУ КО МНОЖЕСТВУ ТРЕТЬИХ МАГНИТОВ, МЕХАНИЧЕСКИ СОЕДИНЕННЫХ С РОТОРОМ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ВВЕРХ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА
1640

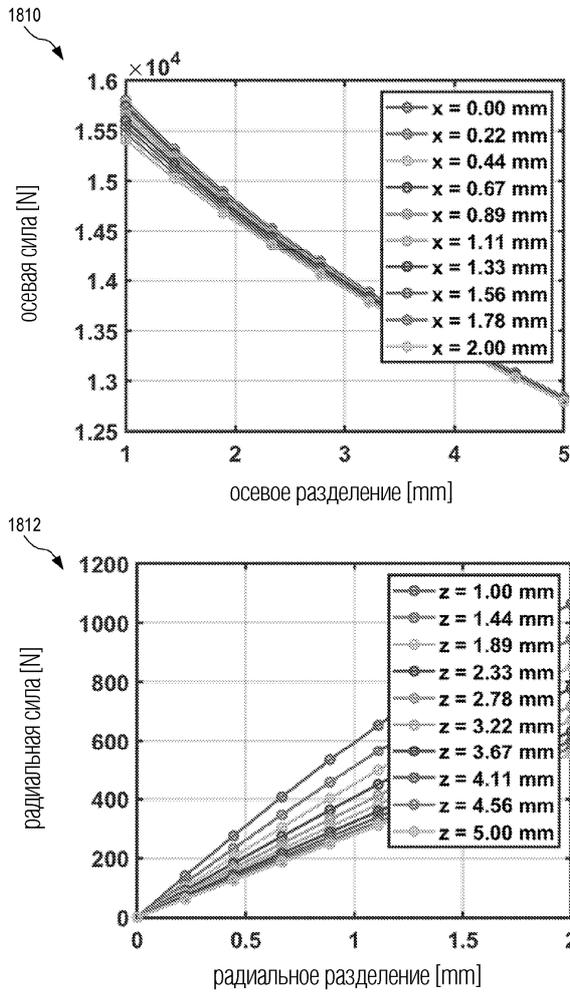
ПАССИВНО ПРИЛОЖИТЬ НАПРАВЛЕННУЮ РАДИАЛЬНО ВНУТРЕЬ СИЛУ КО МНОЖЕСТВУ ЧЕТВЕРТЫХ МАГНИТОВ, МЕХАНИЧЕСКИ СОЕДИНЕННЫХ С РОТОРОМ ДЛЯ УЧАСТИЯ В УМЕНЬШЕНИИ РАДИАЛЬНОГО ДЕЦЕНТРИРОВАНИЯ РОТОРА
1650

ПАССИВНО ПРИЛОЖИТЬ ВТОРУЮ НАПРАВЛЕННУЮ ВНИЗ МАГНИТНУЮ СИЛУ К ЧЕТВЕРТЫМ МАГНИТАМ.
1660

Фиг. 16



Фиг. 17



Фиг. 18