

Магнитная система силового стабилизирующего узла общепланетарного транспортного средства

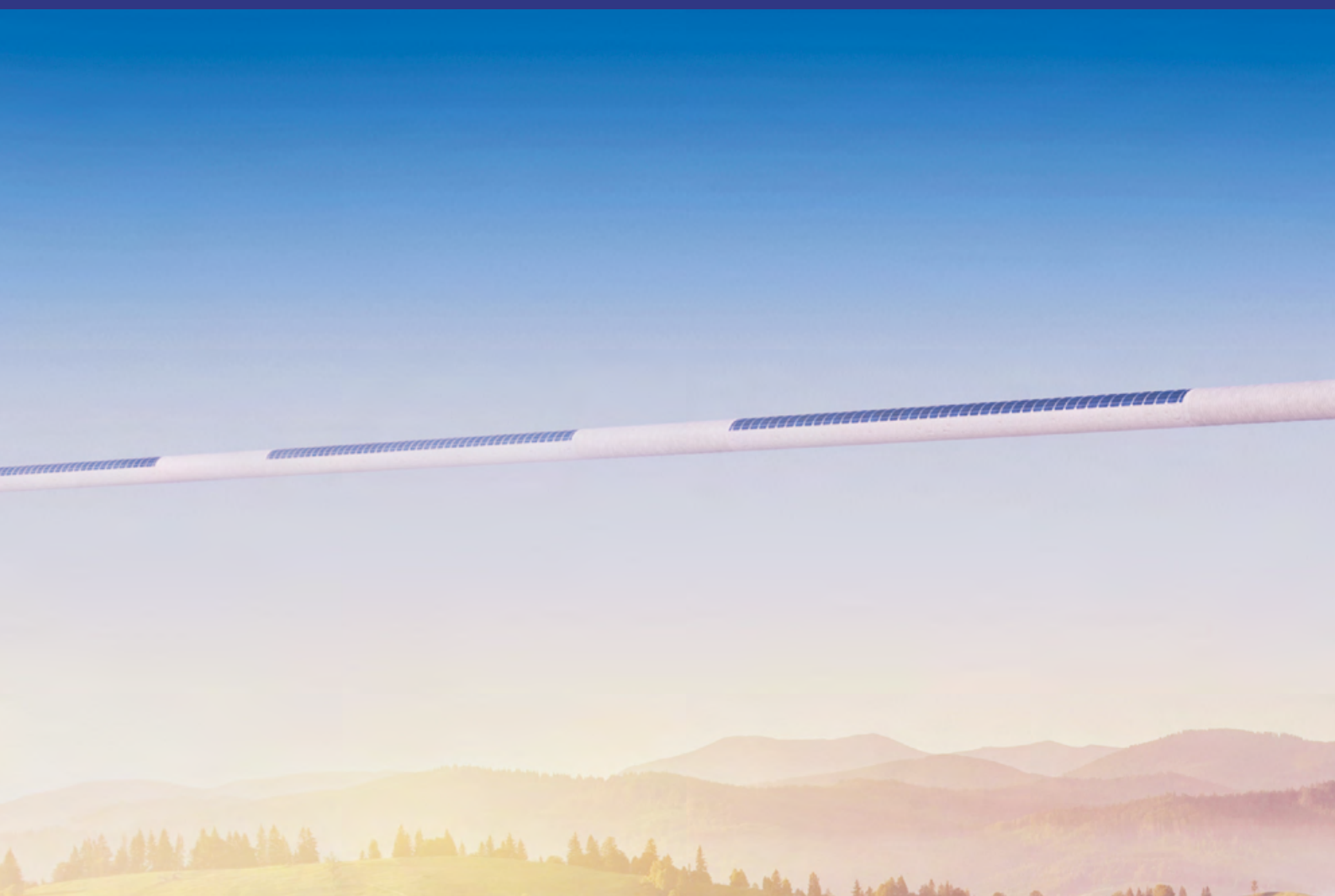
Юницкий А.Э.^{1,2},
доктор философии транспорта

Лукша В.Л.²

¹ ООО «Астроинженерные технологии»,
г. Минск, Беларусь

² ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

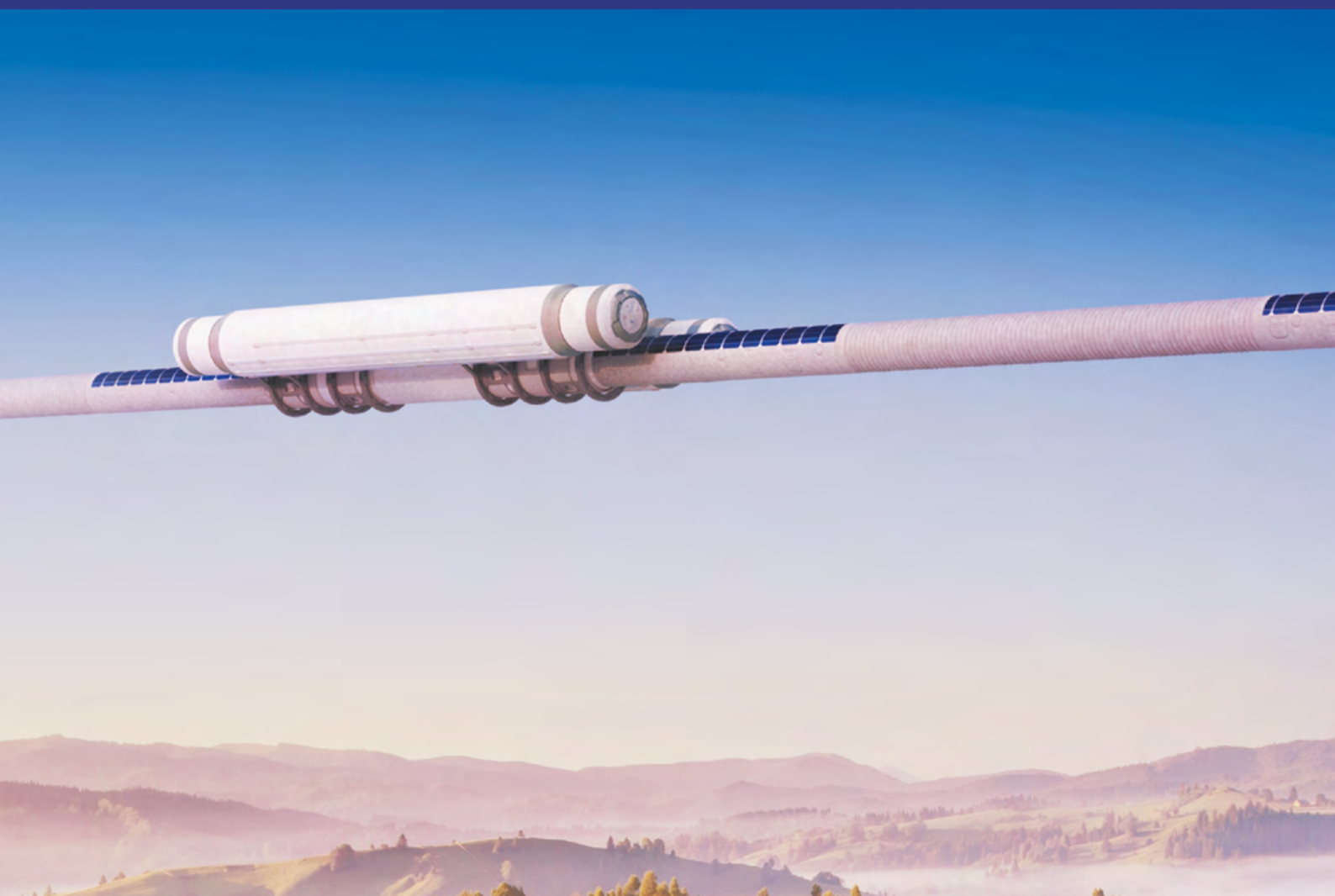
УДК 53.098





Цель исследования – разработка конструкции магнитной системы силового стабилизирующего узла, обеспечивающего ограничение пяти степеней свободы ротора, а также теоретическое изучение его поведения при функционировании. Предложено решение задачи стабилизации центрального положения ротора в канале статора общепланетарного транспортного средства (ОТС) при помощи сил магнитных полей постоянных магнитов. Спроектированная система компенсирует внешние силы, действующие как на ротор при подготовке взлёта, так и на статор при наборе высоты. Смоделирован вариант, когда линейный комбинированный двигатель в составе ОТС выполняет несколько задач: передачу подъёмной силы с маховика на корпус ОТС; удержание маховиков в вакуумных каналах для движения, предотвращая контакт со стенками в статическом и динамическом режимах; разгон маховика, сообщение ему необходимой скорости; преобразование кинетической энергии маховика в электрическую в режиме отбора мощности.

***Ключевые слова:** высокоскоростной линейный двигатель, магнитная левитация, магнитный подвес, общепланетарное транспортное средство (ОТС).*



Введение

Одной из основополагающих составляющих программы безракетного освоения околоземного пространства является геокосмическая транспортная система, позволяющая перемещать к космическому индустриальному ожерелью «Орбита» (КИО «Орбита») пассажиров и грузы, а также спускать их на поверхность нашей планеты.

Инженером А.Э. Юницким более 40 лет назад была предложена конструкция геокосмического транспортно-го средства, способного доставить за один рейс миллионы тонн полезного груза и миллионы людей в ближний космос без применения классических реактивных ракетных двигателей [1, 2]. Функционирование спроектированного изобретателем общепланетарного транспортного средства (ОТС) – самонесущего летательного аппарата, опоясывающего Землю в экваториальной плоскости, массой несколько десятков миллионов тонн – предполагает решение целого ряда сложных инженерных задач. Одна из них – разработка и создание линейного комбинированного электродвигателя длиной 40 000 км, который сможет поднять столь грандиозное сооружение в космос. Никакой другой механизм неприемлем ввиду больших относительных скоростей его подвижных и неподвижных частей.

Силой, которая увлекает ОТС в ближний космос, является центробежная. Она действует на любое тело, движущееся по дуге окружности, и становится тем большей, чем больше масса, выше скорость объекта и меньше радиус окружности, по дуге которой происходит перемещение [3–5].

В конструкции двигателя ОТС присутствует ротор – ленточный маховик, который находится внутри корпуса в вакуумном канале. После получения команды на подготовку к взлёту линейный двигатель начинает разгон ротора. Под действием линейного электродвигателя ротор приходит в движение вокруг Земли по окружности, совпадающей с плоскостью экватора, или параллельно ей. На ротор начинает действовать центробежная сила, направленная в сторону от центра Земли, поднимая маховик вертикально вверх. Таким образом, возникает вопрос о взаимодействии несущегося с огромной скоростью маховика и неподвижно стоящего корпуса ОТС с пассажирами и грузами.

В настоящей работе для решения данной задачи предлагается применение магнитных полей. Описана конструкция магнитной системы силового стабилизирующего узла, обеспечивающей как удержание ротора в вакуумном канале статора, так и передачу центробежной силы от ротора на корпус ОТС. Система автоматически стабилизирует положение корпуса ОТС относительно продольной оси

ротора при возникновении сил любой природы, стремящихся отклонить корпус ОТС в разных направлениях, отличных от данной оси.

Анализ сил, действующих в системе постоянных магнитов силового стабилизирующего узла

Любая система, обеспечивающая левитацию, должна компенсировать действие гравитации. В мировой практике существует два типа таких систем: электродинамические и электромагнитные.

Для реализации левитации в магнитных полях электромагнитов применяют общеизвестное решение. В качестве взаимодействующих компонентов используется пара «ферромагнетик – электромагнит» [6, 7] либо «проводник – электромагнит» [8–10] с обратной связью по положению подвижной части. В данных системах в том или ином виде присутствует один и тот же набор составных функциональных блоков: электромагнит, силовое устройство его питания, устройство контроля положения левитирующего тела и устройство управления электромагнитом на основании информации, поступающей с датчиков устройства контроля. Принцип действия составных блоков такой системы левитации может быть различным, однако алгоритм работы всегда неизменен. Датчик положения отслеживает расстояние до левитирующего тела. Устройство контроля тока, протекающего через электромагнит, на основании сигнала от датчика изменяет ток электромагнита таким образом, чтобы магнитное поле электромагнита, воздействуя на левитирующее тело, возвращало его на заданное расстояние от датчика. Такая система называется электромагнитной.

На рисунке 1 изображены силы, действующие на левитирующее тело: F_1 – сила, с которой электромагнит действует на тело; F_2 – сила всемирного тяготения со стороны планеты, направленная к её центру, лежащему в плоскости экватора. Когда тело находится на заданном расстоянии от датчика, сила F_1 равна нулю. Под действием силы F_2 тело придёт в движение. Расстояние до датчика уменьшится. Автоматически начнёт возрастать сила F_1 , стремящаяся вернуть расстояние на заданное значение (рисунок 1). Равновесное положение в данном случае нестабильно, поэтому тело будет совершать микроколебания, создавая эффект неподвижной левитации.

Электродинамическая левитация основана на возникновении в проводящих материалах вихревых токов, индуцированных переменным электромагнитным полем либо полем движущегося постоянного магнита (рисунок 2).

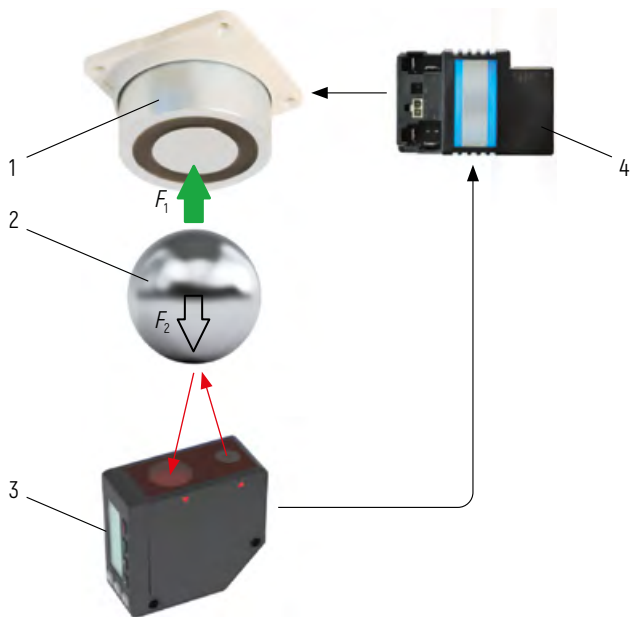


Рисунок 1 – Электромагнитная левитация:
1 – электромагнит; 2 – левитирующее тело;
3 – датчик расстояния; 4 – блок управления

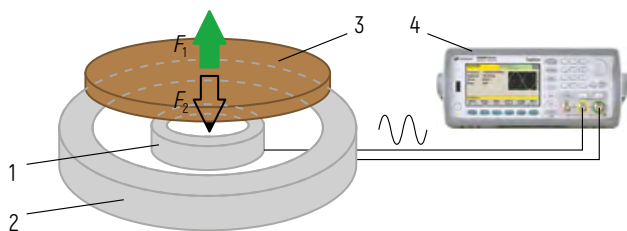


Рисунок 2 – Электродинамическая левитация:
1 – внутренняя катушка; 2 – внешняя катушка;
3 – диск из проводящего материала;
4 – генератор переменного напряжения

Цифрами 1 и 2 (рисунок 2) отмечены две кольцевые катушки, вложенные друг в друга. Сверху размещён диск из проводящего материала. На диск действует сила всемирного тяготения F_2 . При подаче на катушки переменного напряжения в них потечёт переменный ток, который создаст вокруг переменное электромагнитное поле, индуцирующее вихревые токи в лежащем на катушках проводящем диске. Токи создадут вокруг диска переменное электромагнитное поле, которое станет взаимодействовать с полем катушек. Катушки и диск будут отталкиваться. Возникнет сила F_1 (массу диска и параметры катушек выбирают такими, чтобы сила F_1 была больше силы F_2). Диск начнёт движение вверх.

По мере удаления диска от катушек сила F_1 будет убывать. На определённом расстоянии диска от катушек силы F_1 и F_2 сравняются, диск займёт своё равновесное положение в пространстве и начнёт левитировать.

Обе рассмотренные системы требуют постоянного силового питания и бесперебойного питания устройств управления, а также датчиков обратной связи. Кроме того, необходимо дублирование узлов из соображений безопасности.

Третьей используемой системой является «магнит – сверхпроводник» [11, 12]. Метод основан на отталкивании диамагнетика (сверхпроводника) и ферромагнетика (постоянного магнита) (рисунок 3).

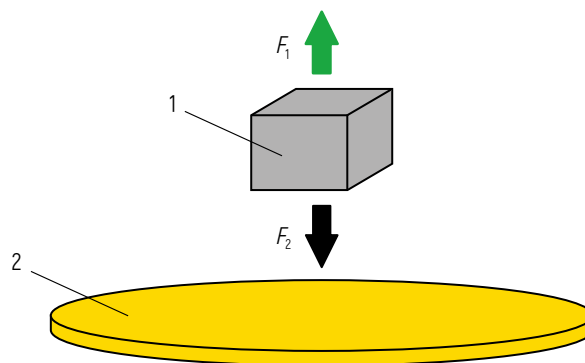


Рисунок 3 – Левитация над сверхпроводником:
1 – постоянный магнит $Nd_2Fe_{14}B$; 2 – керамический диск $YBa_2Cu_3O_7$

Если при комнатной температуре положить магнит на керамический диск, то в материале диска возникнет электрический ток, который возбудит магнитное поле. Это поле, взаимодействуя с полем магнита, будет его отталкивать. Поскольку сопротивление материала диска очень велико, то и ток будет ничтожно мал, как и магнитное поле диска. Если же начать охлаждать материал диска, то его удельное сопротивление будет уменьшаться, а ток согласно закону Ома начнёт расти. По достижении критической температуры (для $YBa_2Cu_3O_7$ – 90 K) материал диска перейдёт в состояние сверхпроводимости. Теперь наведённый вихревой ток будет незатухающим и возбуждённое поле станет вытеснять магнитное поле постоянного магнита из объёма материала диска. Возникнет подъёмная сила F_1 . Когда сила F_1 компенсирует силу гравитации F_2 , магнит начнёт левитировать, что продолжится до тех пор, пока температура диска будет ниже критической. Данная система помимо устройств питания и управления требует наличия двухконтурной гелий-водородной криоустановки,

обеспечивающей рабочую температуру сверхпроводников и нуждающейся в электроэнергии для функционирования.

Для безракетного освоения ближнего космоса необходимо создать систему магнитного подвеса, которой не нужно огромное количество электроэнергии для функционирования. Система должна обладать исключительно высоким КПД и быть относительно экономичной.

Предлагаемая конструкция имеет в своём составе только постоянные магниты и не требует непрерывного силового питания, механизмов контроля и корректировки положения ротора. Рассмотрим работу такой системы.

Если направление дестабилизирующей силы не совпадает с продольной осью движения ротора и перпендикулярной ей плоскостью, эта сила раскладывается на силу, действующую вдоль оси движения ротора (например, силу тяги (торможения) линейного электродвигателя, ускоряющую (или замедляющую) ротор), и силу, перпендикулярную оси движения ротора, которая уравнивается силами системы постоянных магнитов (рисунок 4).

На этапах разгона ротора, отрыва ОТС от взлётно-посадочной эстакады и набора высоты 100 км возможно возникновение дестабилизирующих сил, направленных в любом направлении. На рисунке 4 чёрным цветом изображена дестабилизирующая сила F (выбрана случайно), направленная в объём первого октанта. Рассмотрим её разложение на три составляющие. Силы F_y и F_z будут компенсированы магнитным полем магнитной системы статора, а F_x будет стремиться переместить ротор в полезном направлении.

Главное достоинство решения – полная автономность, отсутствие потребности в питании, системах управления в статическом и динамическом режимах работы. Недостатком является необходимость охлаждения магнитной системы в динамическом режиме [4].

Изучение литературных источников показывает, что многие исследователи магнитной левитации говорят о невозможности создания системы постоянных магнитов,

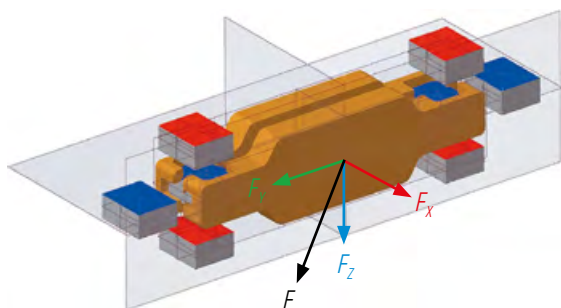


Рисунок 4 – Разложение дестабилизирующей силы

обеспечивающей левитацию твёрдого тела без воздействия на него сил, отличных от магнитных, так как нарушается теорема Ирншоу [13] (сформулирована английским физиком в 1842 г.). В технике с данной теоремой связаны определённые ограничения на решение инженерной задачи разработки устойчивого подвеса тела с помощью полей постоянных магнитов, т. е. без непосредственного соприкосновения с твёрдыми удерживающими конструкциями. Однако предложенная система не нарушает теорему Ирншоу. Жёстко связанные между собой сегменты ротора, как соседние, так и удалённые, оказывают то самое внешнее воздействие друг на друга, делая возможной левитацию.

Магнитная система силового стабилизирующего узла

На рисунке 5 схематично представлена конструкция магнитной системы, состоящей из одинаковых кластеров.

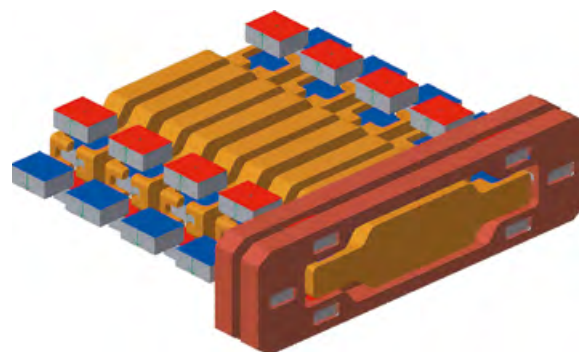


Рисунок 5 – Конструкция магнитной системы

Кластеры собираются отдельно и монтируются между собой, образуя магнитную систему. Каждый кластер (рисунок 6) состоит из двух блоков (статор и ротор), удерживающих постоянные магниты в определённом положении. Статор жёстко соединён с корпусом ОТС, а ротор левитирует в магнитном поле.

Силы магнитного взаимодействия блокируют степени свободы линейного перемещения ротора вдоль осей X и Z , а также степень свободы вращения вокруг оси Y . Механическое взаимодействие магнитных кластеров между собой в совокупности со взаимодействием магнитных полей ограничивают степень свободы вращения вокруг осей X и Z . Остаётся не заблокированной степень свободы линейного перемещения вдоль оси Y (рисунок 7).

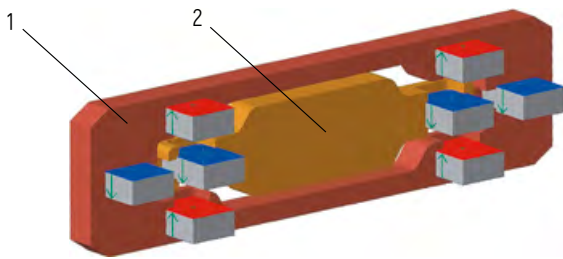


Рисунок 6 – Магнитный кластер: 1 – статор; 2 – ротор

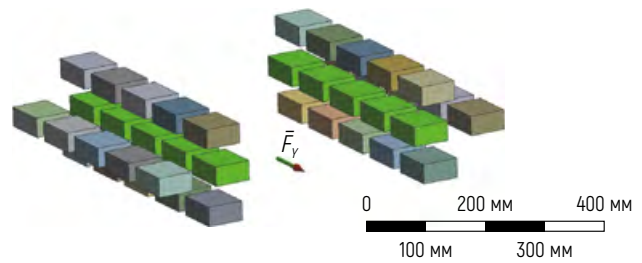


Рисунок 8 – Сила, действующая в направлении оси Y

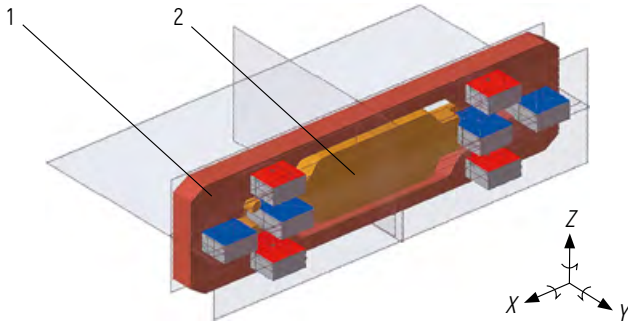


Рисунок 7 – Степени свободы ротора: 1 – статор; 2 – ротор

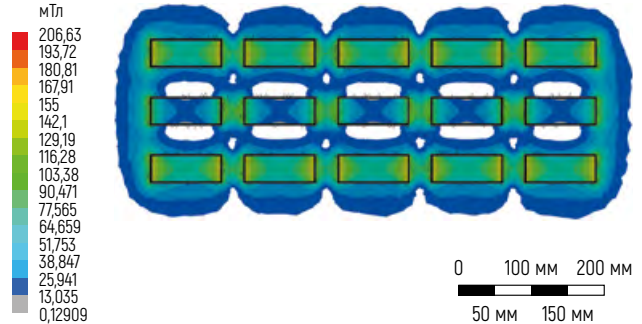


Рисунок 9 – Линии магнитной индукции системы (вид в направлении оси X на основании рисунка 7)

Моделирование

С целью получения информации об устойчивости разрабатываемой системы выполним математическое моделирование силового взаимодействия групп магнитов статора и ротора по принципу суперпозиции. Система размещена в условиях гравитации на уровне моря в статическом положении.

Сила, действующая в направлении движения ротора (вдоль оси Y), представленная на рисунках 7 и 8, равна нулю, так как это результирующая сила, действующая на магниты ротора (на рисунке 8 – зелёного цвета) со стороны магнитов статора. Силовые линии магнитов ротора замыкаются на магниты статора (рисунок 9).

Сила, действующая в направлении, перпендикулярном движению ротора и силе гравитации, – курсовая стабилизирующая сила – также равна нулю, поскольку по условиям моделирования нет сил, стремящихся сместить ротор в направлении оси X (рисунки 7, 10).

Магниты A_1, A_2, A_3 (рисунок 11) выталкивают магнит B в направлении магнита C_2 с силой F_1 . В свою очередь магниты C_1, C_2, C_3 выталкивают магнит D в направлении магнита A_2 с силой F_2 . Если ротор находится на равных расстояниях от магнитов A_2 и C_2 , то силы F_1 и F_2 равны по модулю и противоположны по направлению, а их сумма равна нулю.

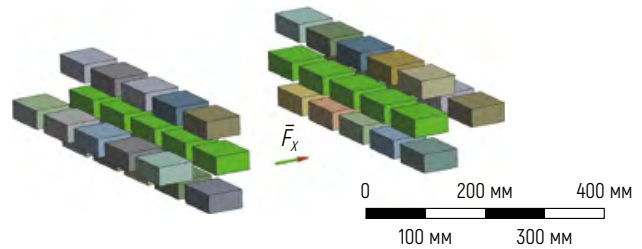


Рисунок 10 – Сила, действующая в направлении оси X

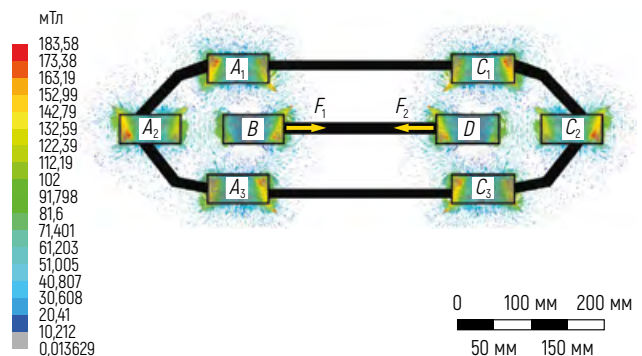


Рисунок 11 – Силы, действующие в направлении оси X со стороны статора

Сила, направленная по оси Z (рисунок 7), – подъёмная сила, равная 2475 Н/м, так как по условиям моделирования на ротор действует сила гравитации, стремящаяся сместить ротор в направлении оси Z , т. е. к центру Земли (рисунки 7, 12).

Сила всемирного тяготения, действуя на ротор, стремится уменьшить расстояние между рядами магнитов 2 и 3 (рисунок 13), а также увеличить расстояние между рядами 1 и 2.

При нарушении равенства расстояний от ряда 2 (ряд ротора) до рядов 1 и 3 (ряды статора) возникает разница сил взаимодействия между рядами, стремящаяся свести к нулю разницу расстояний.

Анализируя рисунки 14 и 15, можно заметить реакцию магнитного поля на дестабилизирующую силу, приложенную к ротору. Плотность магнитного поля перераспределилась таким образом, чтобы результирующая сила всех полей отдельных магнитов компенсировала внешнее возмущение.

Удельная грузоподъёмность магнитного узла – 18 825 Н/м, или 1920 кгс/м. За вычетом массы корпуса и оборудования, а также с учётом криволинейности взлётно-посадочной эстакады фактическая грузоподъёмность ОТС составит 350 кг/м.

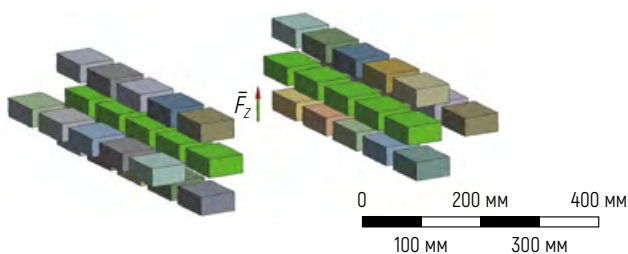


Рисунок 12 – Сила, действующая в направлении оси Z со стороны статора

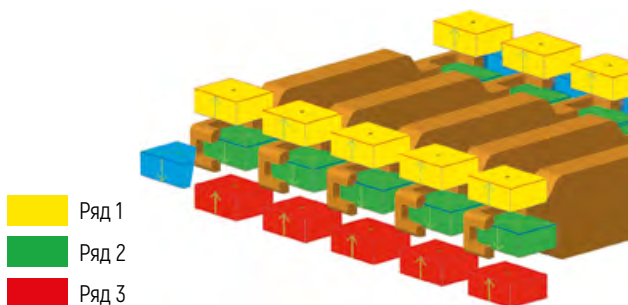


Рисунок 13 – Ряды магнитов ротора (ряд 2) и статора (ряды 1 и 3)

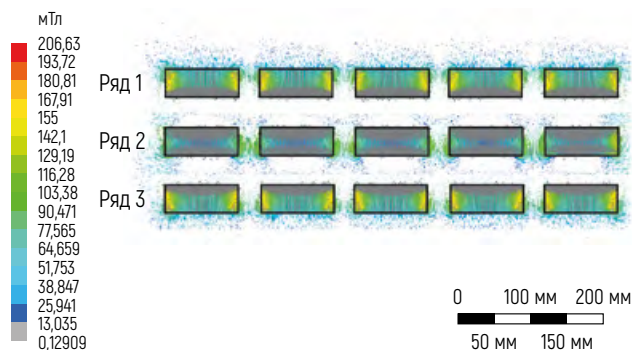


Рисунок 14 – Распределение плотности магнитного поля системы в условиях микрогравитации (вид в направлении оси X на основании рисунка 7)

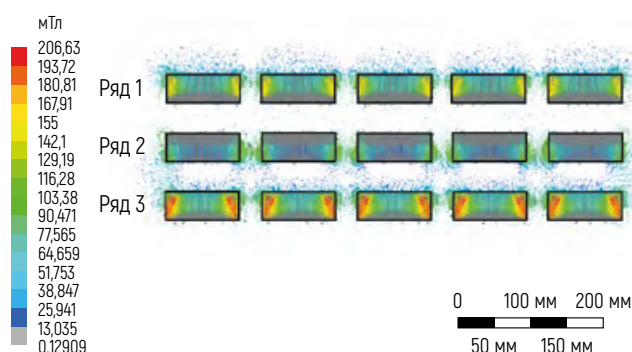


Рисунок 15 – Изменение распределения плотности магнитного поля системы при действии на ротор силы гравитации Земли у её поверхности (вид в направлении оси X на основании рисунка 7)

Выводы и дальнейшие направления исследования

В результате проведённых исследований и расчётов найдена конфигурация магнитной системы, обеспечивающей стабилизацию ротора относительно корпуса ОТС на этапе подготовки взлёта, а также стабилизацию в плоскости горизонта корпуса ОТС относительно ротора на этапах взлёта и посадки.

Форма взлётно-посадочной эстакады в плоскости экватора будет отличаться от идеальной окружности в силу рельефа поверхности Земли (рисунок 16). Магнитная система стабилизирует положение ротора относительно корпуса ОТС в вертикальной плоскости на этапе подготовки к взлёту.

На этапах взлёта и посадки ОТС магнитная система стабилизирует в вертикальной плоскости положение корпуса ОТС относительно ротора, а также устранит вращение

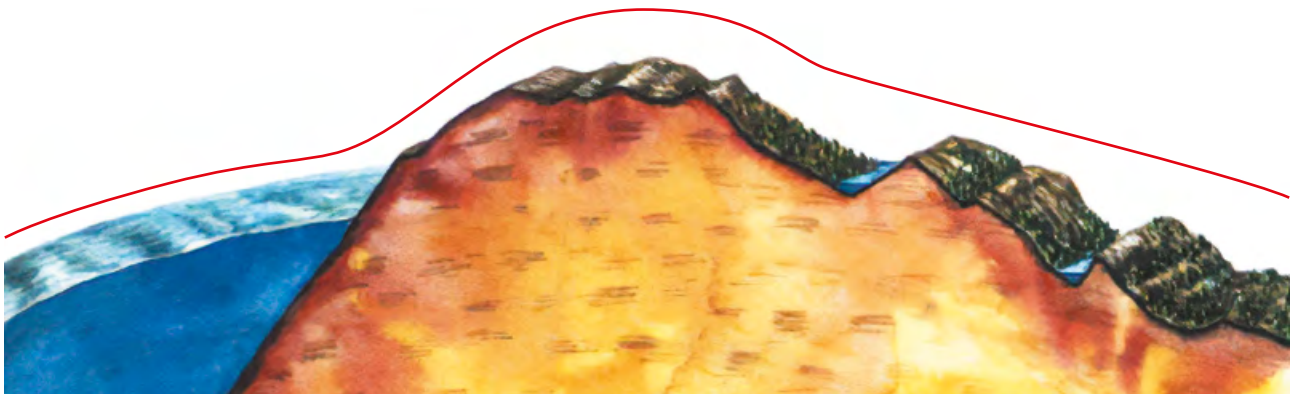


Рисунок 16 – Схема расположения эстакады ОТС в плоскости экватора

ротора внутри канала и исключит возможность контакта ротора со стенками вакуумных каналов на всех фазах эксплуатационного цикла. Вместе с тем описанная система не препятствует движению ротора вдоль каналов.

Дальнейший этап исследований и моделирования – создание конструктива ротора и статора на основании предложенной в настоящей работе концепции взаимодействия магнитов. Кроме того, актуальной задачей необходимо считать решение проблемы эффективности экранирования полей постоянных магнитов, влияющих на перераспределение силовых линий магнитов ОТС.

Литература

1. Юницкий, А. Пересадочная, космическая, кольцевая / А. Юницкий // *Изобретатель и рационализатор*. – 1982. – № 4. – С. 28–29.
2. Юницкий, А. В космос... на колесе / А. Юницкий // *Техника – молодёжи*. – 1982. – № 6. – С. 34–36.
3. Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Марьяна Горка, 21 июня 2019 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: Парадокс, 2019 – 240 с.
4. Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Марьяна Горка, 12 сент. 2020 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтроймедиаПроект, 2021. – 516 с.
5. Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе: науч. издание / А.Э. Юницкий. – Гомель: Инфотрибо, 1995. – 337 с.: ил.
6. *Линейный двигатель: пат. RU 2370874 / Г.В. Никитенко, В.А. Гринченко*. – Опубл. 20.10.2009.
7. Сарапулов, Ф.Н. Исследование тягового линейного асинхронного двигателя конвейерного поезда / Ф.Н. Сарапулов, И.А. Смольянов, И.Е. Родионов // *Электротехника*. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 34–37.
8. Абдуллаев, М. Применение линейных двигателей в электроприводах / М. Абдуллаев, М. Маткасимов, Д. Каримжонов // *Universum: технические науки*. – 2020. – № 11 (80). – С. 12–14.
9. Синюк, К.В. Применение нечёткой логики для систем управления линейным синхронным двигателем с постоянными магнитами / К.В. Синюк, В.А. Анчутин // *Символ науки*. – 2018. – № 3. – С. 21–24.
10. Ахатов, С.Т. Исследование системы синхронной тяги с линейными двигателями / С.Т. Ахатов, В.Г. Солоненко, Н.М. Махметова // *Вестник КазАТК*. – 2021. – Т. 116, № 1. – С. 89–95.
11. Ким, К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости: монография / К.К. Ким. – Саратов: IPR Media, 2019. – 351 с.
12. Пенкин, В.Т. Синхронные электрические машины с композитными и объёмными сверхпроводниками в роторе для транспортных систем / В.Т. Пенкин, К.Л. Ковалёв. – М.: МАИ, 2018. – 216 с.
13. Мартыненко, Ю.Г. О проблемах левитации тел в силовых полях / Ю.Г. Мартыненко // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – № 3. – С. 82–86.