

ПЕРСПЕКТИВЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ РАБОТЫ

Е. С. КИСЕЛЕВСКИЙ

РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», г. Жлобин

В. Я. НЕГРЕЙ, С. А. ПОЖИДАЕВ

УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Потери энергии от трения, возникающего при взаимодействии колес с рельсами, сложность при проектировании токосъемных устройств, вибрации и тряска, неизбежные на высоких скоростях при движении по рельсам, жесткие требования к нижнему строению пути и искусственным сооружениям являются основными проблемами при создании высокоскоростных железнодорожных линий, ограничивает практическую предельную скорость таких поездов.

Преодолеть эти и другие проблемы рельсовых поездов, связанные с наличием большого количества пар трения в ходовых частях подвижного состава, способны поезда, использующие технологию магнитной левитации. При движении они не касаются источников электричества и путевого полотна, по которому перемещаются, удерживаются на небольшой высоте в воздухе при помощи электромагнитного поля и им же приводятся в движение.

На данный момент практическую реализацию получили две основные технологии магнитной левитации: технология электромагнитного и электродинамического подвеса. В свою очередь, в основе каждой технологии магнитного подвеса лежат три основные подсистемы: левитации, стабилизации и ускорения.

Левитационное состояние поездов, построенных на базе технологии электромагнитного подвеса, обеспечивается за счет взаимодействия опорных и направляющих электромагнитов, установленных на поезде, и ферромагнитных элементов пути, обычно изготавливаемых из стали. Магнитное притяжение изменяется обратно пропорционально кубу расстояния между полюсами электромагнитов и пути, поэтому незначительные уменьшения расстояния между ними приводят к значительному увеличению силы. Это делает транспортную систему динамически неустойчивой, что является ее главным недостатком. Небольшое отклонение от оптимального положения сопровождается возрастанием этого отклонения, что требует сложных автоматизированных систем обратной связи для поддержания постоянного расстояния между поездом и путевым полотном (примерно 15 мм) [1]. Работает система левитации от батарей, установленных на борту поезда. Движение осуществляется по монорельсу с Т-образным поперечным сечением путевого полотна. Визуально поезд охватывает путевое полотно со всех сторон.

Левитационное состояние поездов на базе технологии электродинамического подвеса обеспечивается за счет использования в качестве источника постоянного магнитного поля вертикально расположенных по бокам вагона сверхпроводящих магнитов, которые при движении генерируют подъемную силу в горизонтально размещенной путевой обмотке. Это определило вид путевого полотна, который имеет U-образное поперечное сечение. Основным преимуществом систем электродинамической подвески является то, что она динамически устойчива, транспортная система с такой подвеской обходится без активного управления с помощью систем обратной связи. Особенностью технологии электродинамического подвеса является ее эффективность только на больших скоростях. По этой причине поезд должен иметь колеса или какой-либо другой вид шасси для поддержки и приведения в движение, когда скорость для левитации над путевым полотном недостаточна, а так как поезд может остановиться в любом месте, весь участок пути должен давать возможность эксплуатации как на низких, так и на высоких скоростях [1].

Еще одной технологией, пока не используемой на практике, является магнитодинамическая подвеска. Предполагается, что левитационное состояние поездов на базе этой технологии будет обеспечиваться за счет магнитной силы постоянных магнитов, установленных в вагонах и взаимодействующих с витками проводов в путевом полотне [2]. Эта технология способна поддерживать состояние левитации на очень низких скоростях – около 5 км/ч, поэтому поезда также должны использовать какой-либо вид шасси, как при использовании электродинамического подвеса.

Перспектива создания транспортных систем на новых физических принципах работы связана в первую очередь с исследованиями по изучению сверхпроводников – материалов, при понижении температуры которых до некоторой критической величины их электрическое сопротивление резко падает до нуля, т. е. проявляющих свойство сверхпроводимости.

Сопротивление проводников является значительной проблемой, поэтому использование сверхпроводников способно привести к новой технической революции в энергетике, электронике и других областях. Например, в транспортной системе, использующей технологию электродинамического подвеса, применяются сверхпроводящие электромагниты.

Однако более важным свойством сверхпроводников, чем их нулевое электрическое сопротивление, может стать эффект вытеснения внешнего магнитного поля из объёма сверхпроводника при его переходе в сверхпроводящее состояние. Практическое использование эффекта при создании транспортных систем на новых физических принципах работы ещё более расширит сферы использования сверхпроводников. Поэтому сейчас исследованиям в области сверхпроводимости по созданию материалов, проявляющих свойства сверхпроводимости при относительно больших критических температурах – высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) – уделяется большое

внимание. В настоящее время под ВТСП подразумеваются сверхпроводники с критической температурой выше точки кипения азота (77 К или $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Явление высокотемпературной сверхпроводимости наиболее широко известно и изучено в семействе ВТСП керамик. В некоторых составах этого семейства температура сверхпроводящего перехода является одной из самых высоких среди известных сверхпроводников.

При изучении ВТСП керамик у них были обнаружены интересные магнитные свойства: в определенных условиях магнит может стабильно «висеть» в любом положении относительно сверхпроводника, как и сверхпроводник может стабильно удерживаться магнитным полем магнита в любом положении относительно самого магнита.

При охлаждении сверхпроводника, находящегося в магнитном поле, до температуры ниже критической происходит выталкивание магнитного потока из сверхпроводника. При этом содержащие магнитный поток квантовые вихри стремятся выйти из сверхпроводника, перемещаясь из глубины к поверхности. В материалах, обладающих дефектами кристаллической решётки, такое движение магнитного потока затруднено, что приводит к «замораживанию» магнитного потока. Поэтому, чтобы заставить магнитное поле магнита стабильно удерживать ВТСП керамику, ее при нахождении в магнитном поле магнита нужно охладить до температуры ниже критической.

Для установления возможности использования на транспорте вышеназванных особенностей поведения ВТСП керамики в магнитном поле была разработана и изготовлена рабочая малоразмерная модель транспортной системы. Модель транспортной системы включает в себя направляющее путевое полотно и транспортную единицу (рисунок 1).

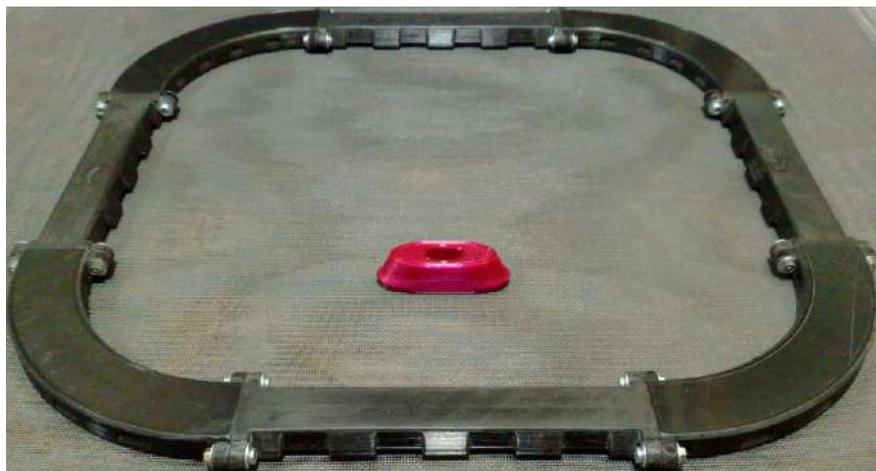


Рисунок 1 – Малоразмерная модель транспортной системы

Все элементы модели транспортной системы запроектированы в среде AutoCAD для трехмерного моделирования (рисунок 2) и изготовлены посредством аддитивной технологии печати на 3D-принтере из пластика PETg (рисунки 1, 3).

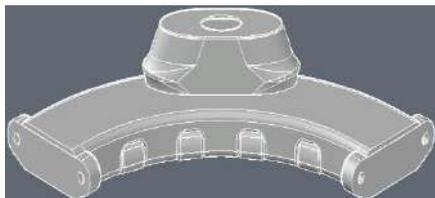


Рисунок 2 – 3D-модель элементов транспортной системы



Рисунок 3 – Элементы транспортной системы в работе

Путевое полотно модели транспортной системы запроектировано с учетом требования к ее разборности как на отдельные элементы (прямые, кривые), так и самих элементов, в которые интегрированы сборки из постоянных магнитов. Это позволило собирать путевое полотно в различных комбинациях по протяженности и направлению, а также изучить поведение ВТСП керамики в магнитном поле различного направления.

Для изучения эффекта левитации и захвата магнитного поля использовалась ВТСП керамика состава $Y_{1,8}Ba_{2,4}Cu_{3,4}O_{7-x}$, устанавливаемая в корпус подвижной единицы. Подвижная единица размещалась над путевым полотном на опорах различной высоты, после чего ВТСП керамика охлаждалась до критической температуры и опоры убирались. Охлаждение керамики производилось жидким азотом, заливаемым в корпус подвижной единицы через горловину в крышке корпуса (см. рисунки 1, 2). С уменьшением высоты опор ВТСП керамика показывала более устойчивое положение в магнитном поле путевого полотна.

Эксперименты с различным взаимным расположением магнитов показали, что оптимальным является продольное в два ряда размещение магнитов в сборке, при этом магниты каждого ряда должны быть обращены одинаковыми полюсами навстречу друг другу. Такой вид магнитной сборки обеспечивает свободное продольное перемещение подвижной единицы вдоль путевого полотна, а частично проникающий в структуру ВТСП керамики и огибающий ее с двух сторон магнитный поток обеспечивает транспортной единице более устойчивое положение в поперечном направлении. Также обеспечивается левитационное состояние подвижной единицы в неподвижном состоянии.

Следовательно, в рассматриваемой транспортной системе подсистемы левитации и стабилизации составляют одно целое. Отличительной особенностью такой транспортной системы является то, что в ней для передвигающегося над путевым магнитным полотном транспорта не будут применяться конструктивные ограничители поперечных перемещений. Направляющее путевое полотно будет плоским (см. рисунок 1). Так как транспортные единицы будут опираться на магнитное путевое полотно с помощью ВТСП керамики, то количество опорных мест, их площадь, а также количество магнитных

направляющих в путевом полотне должно будет определяться исходя из требуемой грузоподъёмности, скорости передвижения и поперечной устойчивости в движении.

Одной из проблем рассматриваемой транспортной системы является охлаждение и длительное поддержание температуры ВТСП материалов ниже критической. Для этих целей хорошим решением может стать использование твердого азота. Твердый азот имеет очень большую теплоемкость, поэтому охлаждаемая твердым азотом магнитная система может несколько часов находиться при температуре, достаточной для работы системы [3].

Таким образом, уже сейчас задачу создания транспортных систем на новых физических принципах работы возможно решить применением материалов, обладающих свойством сверхпроводимости. Изучение этих материалов в настоящее время актуально, особенно в направлении поиска высокотемпературных стабильных соединений. Основной целью исследований в этой области является поиск материалов, работающих как минимум при широко распространённой температуре – порядка $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта задача осложнена тем, что чётко сформулированной теории сверхпроводимости в оксидных ВТСП не существует. Однако изучение проблемы уже привело к интересным экспериментальным и теоретическим результатам, и в будущем будут новые открытия в этой области, а транспортные системы на новых физических принципах работы займут свою нишу в обеспечении пассажирских и грузовых перевозок.

Список литературы

1 **Дмитриев, А. И.** Транспортные системы на основе магнитной левитации: технология, экономика, безопасность / А. И. Дмитриев // Транспортное право и безопасность. – 2016. – № 8. – С. 24–35.

2 **Квитко, К. Б.** Сравнительный анализ технологий высокоскоростного рельсового транспорта / К. Б. Квитко // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО : материалы XLVI науч. и учеб.-метод. конф., Санкт-Петербург, 31 янв.–2 февр. 2017 г. / Ун-т ИТМО. – СПб., 2017. – Т. 6. – С. 126–129.

3 **Волков, М. П.** Эффективность применения твердого азота для охлаждения систем магнитолевитационного транспорта / М. П. Волков // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 116–117.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

■ Киселевский Евгений Сергеевич, г. Жлобин, Жлобинское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», осмотрщик-ремонтник вагонов, KisEvgenix@mail.ru;

■ Негрей Виктор Яковлевич, г. Гомель, УО «Белорусский государственный университет транспорта», д-р техн. наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда», uer@bsut.by;

■ Пожидаев Сергей Александрович, г. Гомель, УО «Белорусский государственный университет транспорта», канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда», uer@bsut.by.