

УДК 629.4.027:629.439

*В. М. ГОРСКИЙ, доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика» Белорусского государственного университета транспорта, г. Гомель, А. А. ГАЛЕНКО, Инженерно-научный центр ТЭМП, г. Москва*

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ НА МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКЕ

Изложен краткий обзор технического прогресса транспорта на магнитной подвеске и указаны тенденции его дальнейшего развития. Даны основные характеристики и краткое описание конструктивных особенностей подвижного состава на магнитной подвеске в разных странах.

Работы по созданию транспортных систем с подвижным составом на магнитной подвеске (МП) с линейным приводом начаты в наиболее развитых зарубежных странах в шестидесятых годах и особенно активно проводятся в последние годы в ФРГ, Японии, Великобритании, Канаде. Эти работы выполняются крупнейшими национальными корпорациями и фирмами, которые специализируются в области железнодорожного транспорта, авиационной техники, электротехники, электроники и в других областях и используют новейшие достижения науки, техники и технологии.

В ФРГ разрабатываются две системы: высокоскоростная транспортная система "Трансрапид" с электромагнитной подвеской экипажа и система городского общественного транспорта "M-Bahn" (Magnet Bahn), использующая принцип подвешивания на постоянных магнитах в комплексе с колесной подвеской.

Японские национальные железные дороги разрабатывают высокоскоростную транспортную систему на электродинамической подвеске (ЭДП) по принципу отталкивания с использованием сверхпроводящих магнитов и криогенной техники, а авиакомпания ДЖАЛ осуществляет вариант электромагнитной подвески экипажей (ЭМП), принципиально подобной системе "Трансрапид".

При разработке систем городского транспорта в Великобритании использован принцип ЭМП, а в Канаде применяется колесная подвеска в сочетании с линейным электроприводом. При испытаниях натурных образцов скоростного подвижного состава на магнитной подвеске в Японии достигнута рекордная скорость движения 517 км/ч (21.12.79), в ФРГ экипаж "Трансрапид 06" в эксплуатационном режиме развил максимальную скорость 412,6 км/ч (22.01.88), что свидетельствует о высоких технических возможностях новых транспортных систем.

По системе "Трансрапид" с 1985 года ведутся эксплуатационные испытания подвижного состава на испытательном полигоне в Эмсланде [1] (рисунок 1).

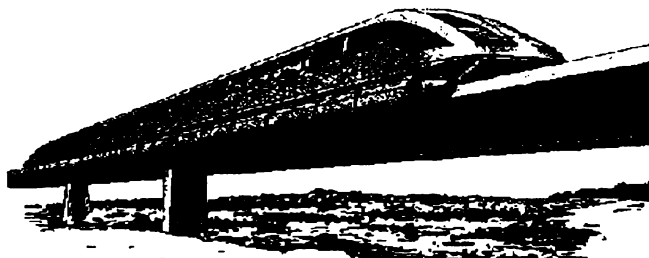


Рисунок 1 – Двухсекционный экипаж "Трансрапид 07"

Путь новой транспортной системы общей протяженностью 31,5 км, проложенный на эстакаде на высоте около 5 м от уровня земли, включает средний прямолинейный участок и две петли по концам с радиусами кривизны 1690 м (северная петля) и 1000 м (южная). Предусмотрены также участок с продольным уклоном, стрелочные переводы и ответвление пути к монтажно-испытательному корпусу. Стрелочный перевод состоит из сквозной стальной балки, которая упруго изгибается при помощи гидравлического исполнительного механизма и отжатым концом стыкуется с ответвлением пути. Проход вагоном стрелок на боковой путь допускается со скоростью 200 км/ч.

Подвижной состав "Трансрапид 06" представляет собой двухсекционный экипаж (вагон), состоящий из механически и электрически связанных симметричных секций. Он имеет длину 54,2 м, ширину – 3,7 м и высоту – 4,2 м, вмещает 192 пассажира при размещении мест по схеме 3+2. Общая масса составляет 122 т, полезная нагрузка – 200 кН. Кузов экипажа опирается на ходовую часть, которая охватывает направляющий путь с обеих сторон и обеспечивает электромагнитную подвеску и направление экипажа. Тяга осуществляется синхронным линейным электродвигателем с развернутым на пути статором.

За время испытаний на полигоне в Эмсланде пробег экипажа "Трансрапид 06" составил более 60 тыс. км. Движение экипажа осуществлялось по расписанию с перевозкой пассажиров.

В начале 1989 г. поступил на эксплуатационные испытания новый образец экипажа "Трансрапид 07". Хотя по внешнему виду и основным габаритам он мало чем отличается от модели 06, однако имеет усовершенствованную электромагнитную несущую и направляющую системы, оптимальную аэродинамику и улучшенную систему безопасности. Благодаря оптимизации электромагнитных устройств и применению конструкций из алюминиевого литья масса нового экипажа уменьшена примерно на 20 т.

"Трансрапид 07" может изготавливаться в 2, 3 и 4-секционном вариантах. При этом длина экипажа составит примерно 51; 75 и 100 м соответственно. Максимальная расчетная скорость движения – 400 – 500 км/ч.

Основной целью комплексных испытаний системы "Трансрапид" является определение области ее применения и надежности работы отдельных компонентов при максимальных скоростях движения, а также практическое сравнение технико-эксплуатационных показателей системы "Трансрапид" с традиционными рельсовыми видами транспорта.

Сравнение эксплуатационных скоростей движения различных видов транспорта показывает (рисунок 2), что с увеличением максимальной скорости движения железнодорожных поездов (например, TGV) конкурентоспособность их с автомобильным транспортом возрастает. При максимальной скорости движения подвижного состава системы "Трансрапид" 400 км/ч эксплуатационная скорость его превышает 200 км/ч для расстояний между конечными пунктами 700 км и более. При расстоянии менее 600 км система "Трансрапид" является наиболее скоростной, в том числе и по сравнению с авиационным транспортом [2].

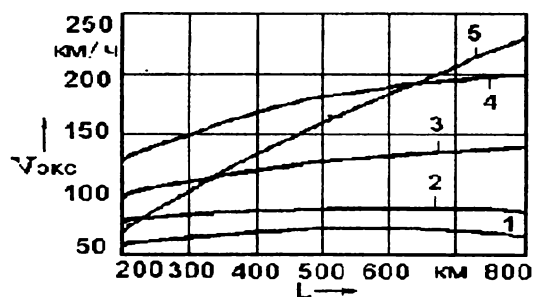


Рисунок 2 – График эксплуатационных скоростей различных видов транспорта: 1 – железнодорожный транспорт; 2 – автомобильный транспорт; 3 – скоростные электропоезда TGV (Франция); 4 – система "Трансрапид"; 5 – авиационный транспорт

Новая транспортная система вполне применима для связи центров крупных городов с аэропортами.

Система M-Bahn является новым видом городского общественного транспорта, использующим принцип притяжения постоянных магнитов, установленных на тележках экипажа, к полосам статора линейного электродвигателя, расположенного на пути. Дополнительно предусмотрена механическая система вертикальных (верхних и нижних) ходовых колес, которые регулируют величину магнитного зазора между элементами пути и ходовой части подвижного состава (рисунок 3) [2].

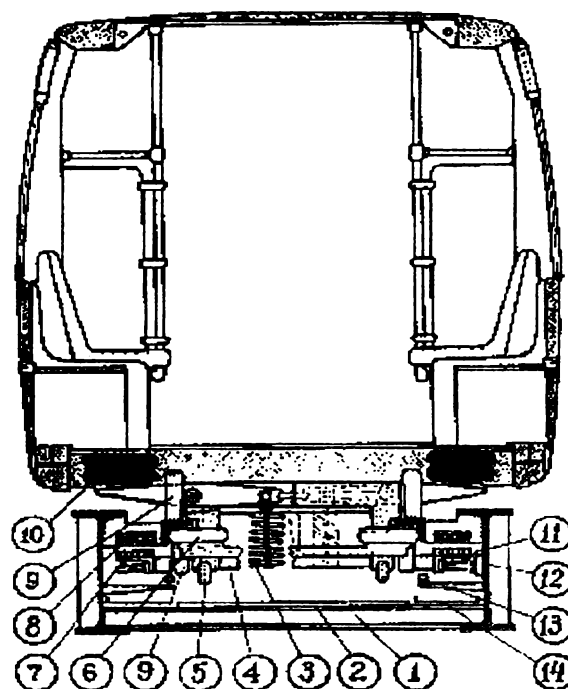


Рисунок 3 – Транспортная система "M-Bahn": 1 – путь; 2 – поперечная балка; 3 – первичное подрессоривание (пружина); 4 – экипаж ходовой части (тележки); 5 – ролики для перевода стрелок; 6 – горизонтальные направляющие ролики; 7 – постоянные магниты; 8 – статор линейного двигателя; 9 – вертикальные ходовые ролики (колеса); 10 – пневмоподвешивание; 11 – токоприемник; 12 – токонесущие стержни; 13 – линии (кабели) управления; 14 – канал укладки кабелей

Величина зазора поддерживается в пределах от 14 до 25 мм из условия получения силы магнитного притяжения (разгрузки колес), составляющей до 95 % от массы экипажа (примерно 5 % нагрузки приходится на колеса). Меньшая величина зазора соответствует полной загрузке экипажа и максимальной силе притяжения магнитов, а увеличенный зазор – порожнему экипажу. Боковая стабилизация подвижного состава осуществляется с помощью горизонтальных направляющих роликов.

В качестве подвижного состава M-Bahn используются экипажи кабинного типа, представляющие собой цельносварную конструкцию из легких алюминиевых сплавов. Масса экипажа составляет

9,5 т, длина кузова равна 11,72, высота – 2,4 и ширина – 2,3 м. В салоне экипажа предусмотрено 38 мест для сидения, а полная вместимость составляет 80 человек. Управление экипажем полностью автоматизировано.

Испытания основных компонентов системы М-Bahn проводятся с 1976 г. на полигоне в Брауншвейге, а первая демонстрационная линия сооружена в Западном Берлине. Линия выполнена двухпутной, имеет протяженность 1,6 км.

Эксплуатация линии позволит проверить надежность системы, ее энергетические характеристики, которые ожидаются на 40 % лучше по сравнению со скоростным трамваем. Предполага-

ется, что уровень шума не превысит 60 дБ на расстоянии 25 м от пути.

Японские национальные железные дороги разрабатывают транспортную систему "Maglev" (ML), отличительной особенностью которой является электродинамический подвес по принципу отталкивания, использующий сверхпроводящие магниты и криогенную технику, что обеспечивает эффективный зазор левитации в системе подвешивания до 100 мм против 10 – 15 мм при электромагнитной подвеске (рисунок 4.).

Для исследований и испытаний экспериментальных образцов подвижного состава сооружен испытательный полигон в Миязаки, включающий лабораторно-монтажный корпус и участок пути длиной 7 км.

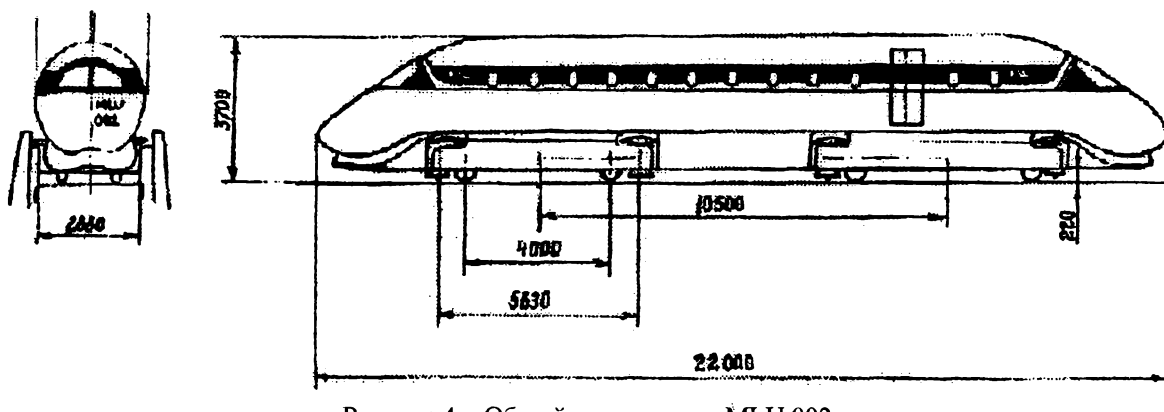


Рисунок 4 – Общий вид экипажа MLU 002

В 1978-1979 гг. на Т-образном пути полигона проведены испытания экипажа ML 500, который достиг рекордной скорости 517 км/ч. После этого направляющий путь был переоборудован на U-образную форму, что позволило увеличить вместимость подвижного состава и улучшить общие показатели системы. На новом пути с 1980 г. начались испытания трехвагонного (трехсекционного) состава MLU 01 с головными вагонами по концам и промежуточным между ними.

В 1989 году поступил на испытания новый образец экипажа MLU 002. Он представляет собой одиночный вагон с кабинами управления по концам и имеет длину 22, ширину 3,0 и высоту 3,7 м. В салоне предусмотрено 44 места для сидения. Масса вагона составляет 17 т, максимальная скорость движения – 420 км/ч.

Ведущая компания Японии JAL (Japan Air Lines) разрабатывает вариант экипажа на электромагнитной подвеске, принципиально подобной системе "Трансрапид".

Опытный экипаж HSST-03 изготовлен из легких алюминиевых сплавов и имеет массу около 15 т при полной нагрузке (40 сидящих пассажиров, машинист и его помощник). Длина экипажа 13,7, ширина – 2,95, высота – 3 м. Кузов экипажа устанавливается на шести модулях, по три с двух

сторон. Каждый модуль содержит четыре электромагнита, обеспечивающих магнитную левитацию, и один линейный двигатель для тяги и торможения. Модули соединены с кузовом через гидравлические цилиндры, которые обеспечивают необходимые смещения модулей относительно кузова.

Первый опытный экипаж HSST в 1978 г. на испытательном участке пути Хигаши – Огишима развил максимальную скорость 307,8 км/ч.

В начале разработок экипаж авиакомпании JAL для осуществления режима левитации потреблял мощность 3 кВт на одну тонну. Впоследствии это соотношение снизилось до 1,5 кВт и ставится задача достичь показателя 1,0 кВт/т.

С учетом затрат на тягу и другие нужды предполагается, что при эксплуатации коммерческих поездов со скоростью 300 км/ч общая потребляемая мощность на одного пассажира составит не более 500 Вт.

По проекту компании JAL поезда HSST могут использоваться для связи центров крупных городов с аэропортами, в частности, центра города Токио с новым аэропортом Норита, удаленным от него на 66 км.

Прорабатываются и другие варианты использования таких поездов. Предлагается, например,

на направляющей эстакаде иметь сверху два пути для высокоскоростного движения дальних поездов на магнитной подвеске и снизу два пути для "подвесных" поездов на такой же подвеске, движущихся до 80 км/ч с частыми остановками. Для обоих поездов могла бы быть использована одна система энергоснабжения, что повысило бы их экономичность.

Однако вопрос о том, будет ли какая-либо система доведена до коммерческой эксплуатации, пока остается открытым главным образом из-за недостаточности финансирования.

В Англии с 1984 года эксплуатируется коммерческая линия с подвижным составом на электромагнитной подвеске, связывающая новый аэровокзал с Национальным выставочным центром в г. Бирмингеме.

Двухпутная линия длиной 620 м предназначена для городских пассажирских перевозок и представляет собой своеобразную систему "Кабинных такси", движущихся по каждой колее в одно- или двухкабинном составе со скоростью до 40 км/ч. В качестве тягового привода применен линейный индукционный двигатель одностороннего типа, статорная обмотка которого находится на кабине, а ротор (реактивная шина) расположен на пути по центру колеи. Управление кабинами полностью автоматизировано и осуществляется с помощью компьютера. Длительность поездки в одну сторону составляет 90 секунд [2].

Каждая кабина вмещает до 40 человек, обеспечивая провозную способность линии до 3200 пас/ч в одном направлении. В часы пик кабины курсируют непрерывно, а в остальное время – по мере необходимости. Станции на концах линии имеют закрытые платформы и раздвижные двери, открывающиеся синхронно с дверями кабин.

Новая транспортная система разработана Научно-исследовательским центром Британских железных дорог в Дерби, который дополнительно предложил систему стрелочных переводов, что значительно расширит возможности ее применения. Разработчики считают, что эта бесшумная, не загрязняющая окружающую среду транспортная система может использоваться не только для перевозок пассажиров, но и для грузовых перевозок в морских портах, аэропортах и других подобных местах.

В Канаде корпорацией ИТДС создана и эксплуатируется с 1985 г. в Торонто и Ванкувере новая автоматизированная система городского общественного транспорта с колесной подвеской и тяговым приводом от линейных асинхронных электродвигателей, по техническим решениям и режиму работы близкая к метрополитену [2].

Новая транспортная система использует обычный рельсовый путь с нижним токосъемом (600 В постоянного тока), по центру колеи которого, вдоль пути уложена реактивная полоса – статор. Подвижной состав облегченного типа выполнен на тележках со стальными колесами. Тележки оборудованы линейными асинхронными двигателями мощностью по 120 кВт. Так как колеса тележки не являются ведущими, то они изготовлены с уменьшенным диаметром, равным 460 мм.

Кузов вагона изготовлен из легких алюминиевых сплавов, за исключением торцевых стенок, которые отформованы из пластмасс. Длина кузова равна 12,5, ширина – 2500 и высота – 3125 мм. Вагон вмещает 75 чел. Конструкционная скорость вагона – 100 км/ч, а максимальная в эксплуатации – 90 км/ч.

Система автоматического регулирования "Селтрак" обеспечивает движение поездов с интервалом 90 секунд. Минимальный расчетный интервал движения равен 60 с, в этом случае при эксплуатации 4-вагонных поездов провозная способность линии составит 20 тыс.пас/ч в одном направлении.

В 1987 году вступила в строй аналогичная транспортная система в г. Дейтройте, США. Протяженность линии составляет 4,7 км, количество подвижного состава – 12 вагонов. В числе преимуществ новой транспортной системы отмечаются пониженный уровень шума, прохождения по кривым малых радиусов (18 м), небольшая масса подвижного состава и путевых устройств. Тяга создается не сцеплением колес с рельсами, а бесконтактным способом с помощью электродвигателей, в результате чего колеса являются только поддерживающими и существенно снижается их износ.

В заключение следует отметить, что транспортные системы на магнитной подвеске интенсивно разрабатываются во всех технически развитых странах мира. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными колесными: реализация больших скоростей движения до 400 – 500 км/ч, уменьшение затрат энергии на передвижение из-за отсутствия механического контакта между транспортным средством и путевым полотном в режиме левитации, уменьшение шума и загрязнения окружающей среды и др.

По системам магнитной подвески экипажей разработки относятся, главным образом, к электромагнитной (ЭМП) и электродинамической (ЭДП) системам и подвеске на постоянных магнитах (МП).

Наибольшее развитие получила система ЭМП. Принцип подвески с использованием сил притя-

жения основан на взаимодействии магнитных полей, создаваемых электромагнитами, размещенными на подвижном составе, и ферромагнитными направляющими, закрепленными на пути. Электромагниты используются в качестве несущих и направляющих элементов. В этой системе главной задачей является сохранение (регулирование) постоянного зазора между электромагнитами и трассой на протяжении всего пути. В системе ЭМП узлы обеспечения левитации и автоматики работают надежно. Хорошо решены вопросы осуществления боковой стабилизации экипажа в режиме левитации.

Большими недостатками этого вида подвески являются малые зазоры между электромагнитами вагона и ферромагнитными полосами пути (зазор левитации), а также между скользунами посадочных устройств и путевыми направляющими (верхний зазор). При увеличении зазора левитации значительно возрастают энергозатраты на осуществление подвеса экипажа. Верхний зазор можно увеличить, если использовать в конструкции подвижного состава опорно-посадочные устройства с быстродействующими выдвигаемыми лыжами, работающими в БелГУТе [4].

Следует признать перспективность принципа электродинамической подвески (ЭДП). В некоторых металлах при глубоком охлаждении существенно уменьшается электрическое сопротивление (свойство сверхпроводимости). Электромагниты со сверхпроводящими короткозамкнутыми обмотками не нуждаются в непрерывных источниках питания и устанавливаются на вагоне, а на пути укладываются замкнутые контуры (обмотки) на определенном расстоянии друг от друга или же непрерывные алюминиевые шины. При движении вагона сверхпроводящие магниты наводят в путевых контурах индукционные токи, взаимодействие которых с полями магнитов обеспечивает создание подъемной силы (отталкивание). Величина подъемной силы в системе ЭДП зависит от скорости

движения транспортного средства, поэтому такой вагон должен быть оборудован ходовыми колесами для поддержания экипажа при низких скоростях движения и на остановках.

Практическое использование этой системы в настоящее время сдерживается главным образом недостаточным развитием криогенной техники. Создание сверхпроводящих магнитов с незначительными потерями энергии в цепях при обычных температурах значительно продвинет применение этого типа подвески. К недостаткам ЭДП также относится высокая стоимость путевых контуров и возникновение в них сил, тормозящих движение вагона.

Системы с постоянными магнитами вряд ли целесообразно использовать для скоростных перевозок пассажиров. Однако они могут эффективно применяться в заводских технологиях при перевозках отдельных грузов и для осуществления цеховых поточных линий.

Обобщая приведенные в статье материалы, можно выделить следующие основные направления работ по использованию транспортных систем с подвижным составом на магнитной подвеске.

Транспортные системы используются как для обслуживания магистральных линий, так и для городского общественного транспорта. Движение на коротких магистральных трассах предполагается, как правило, без остановок с максимальной скоростью до 300 км/ч. В основном это трассы между аэропортами и центрами городов.

Протяженность длинных магистральных линий должна составлять более 250 км, а реализуемая максимальная скорость на них – до 400 – 500 км/ч. В области городского общественного транспорта в настоящее время используются главным образом традиционные виды транспорта. Городские транспортные системы с подвижным составом на магнитной подвеске находятся в основном на стадии экспериментальных исследований и полигонных испытаний.

#### Список литературы

1. Железнодорожный транспорт-89 (специальный журнал к 4-й Международной выставке). М.: Экспоцентр, 1989. С. 21 – 25.
2. Экспресс-информация ВИНТИ. Сер. Городской транспорт. М., 1989. № 11. С. 4 – 12; № 15. С. 4 – 7; 1986. № 45. С. 19 – 24; № 46. С. 19 – 20.
3. International Railway Journal, 1984. № 6. P. 40 – 44 (перевод ВНИИВ, арх. № 1093, М., 1985. 13 с).
4. Галенко А. А., Горский В. М., Заворотный А. В. Выбор оптимальных параметров опорно-посадочных устройств вагона на магнитной подвеске // Динамика скоростного транспорта на электромагнитной подвеске. М., 1992. С. 44 – 51.

Получено 3. 10. 98

V.M. Gorsky, A.A. Galenko. Trends in development of transport system having rolling stock on magnetic suspension.

The paper reviews the questions of technological progress in transport on magnetic suspension. The prospects of its further development are shown. Main characteristics and brief description of structural peculiarities of the rolling stock on magnetic suspension are given in the paper.