

Направление подготовки: 140400 Электроэнергетика и электротехника

Профиль подготовки: Электрический транспорт

Квалификация (степень) выпускника: магистр

Форма обучения: очная

Дисциплина: "Электрооборудование и системы управления электроподвижным составом"

Комаров В.Г.

Лекция 3

10.03.2026 г.

## Тема: Обзор электрооборудования и систем управления магнитолевитационного электрического транспорта

Магнитная левитация (маглев)— технология, метод подъёма объекта с помощью магнитного поля. Магнитные силы при этом используются для компенсации ускорения свободного падения или любых других ускорений.

### Способы реализации магнитной левитации

- 1) Статическая левитация, когда подъёмные силы практически не зависят от скорости движения;
- 2) Электродинамическая левитация, когда подъёмная сила возникает только при движении левитирующего объекта.

Оба этих способа левитации могут быть осуществлены с использованием

- постоянных магнитов
- электромагнитов
- сверхпроводящих магнитов

### Подъёмная сила

Магнитные материалы, как и проводники с электрическими токами, способны притягивать или отталкивать друг друга с силой, зависящей от силовой характеристики магнитного поля, т. е. индукции магнитного поля. Из этого следует, что может быть определено магнитное давление. Для расчёта магнитного давления используются формулы Максвелла и энергетические формулы, полученные из энергетического баланса электромеханической системы.

Для равномерного магнитного поля в зазоре и ненасыщенной магнитной системы магнитное давление подсчитывается по формуле Максвелла:

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} ,$$

где  $p_{mag}$ — сила на единицу площади поверхности взаимодействия в Паскалях,

$B$  —магнитная индукция в зазоре в Теслах, и

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$  — магнитная проницаемость вакуума.

Если магниты расположить в путевой структуре и в подвижном составе, то можно получить «магнитную левитацию» — парение. Ходовая часть подвижного состава оказывается подвешенной в пространстве относительно путевой части. Если эту пару — ходовую часть и путевую структуру — рассматривать как развернутый электродвигатель, то мы получим перемещение ходовой части (ротора, который теперь является бегуном) относительно путевой структуры (статора). При этом, меняя направление электрического тока в статоре развернутого двигателя, получаем или разгон подвижного состава, или его торможение. Рассмотрим использование эффекта магнитной левитации в технологии «Transrapid» (рис. 1). На рисунке развернутый статор обмотки изображен зеленым цветом и размещается в путевой структуре, а ротор изображен красным цветом и располагается на ходовой части подвижного состава. Электромагнитные поля, создаваемые в статоре, притягивают ротор (поезд), в результате чего поезд «вывешивается» в вертикальной плоскости. Аналогичная система обеспечивает направляющую, боковую стабилизацию. Приводящий момент обеспечивается подачей переменного тока в статор обмотки развернутого двигателя. Путем переключения фаз обмотки статора получают тормозную силу.

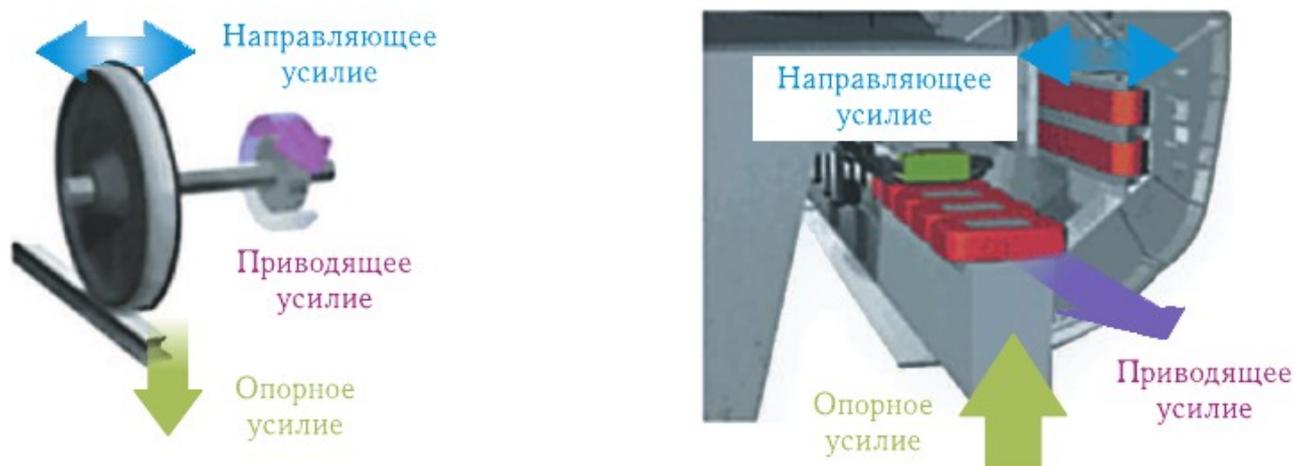


Рис. 1. Направляющее, приводящее и опорное усилия в технологиях «колесо-рельс» (слева) и магнитной левитации (справа).

История магнитолевитационного транспорта насчитывает более 100 лет. В 1904 г. американский ученый Р. Годдарт выдвинул идею поезда, опирающегося на магнитное поле. Такому поезду не нужно традиционное для наземного транспорта колесо, которое выполняет функции опоры, направления движения и осуществляет тягу путём механического контакта с путевой структурой (рельсом). Подвижной состав магнитолевитационного транспорта с помощью магнитных систем подвеса и направления движения удерживается и стабилизируется относительно путепровода на заданном расстоянии и приводится в движение без контакта с путевой структурой линейным электродвигателем, преобразующим электрическую энергию непосредственно в поступательное движение без промежуточных механических звеньев. Предел скорости такого транспорта ограничивается лишь требованиями целесообразности с учетом энергетических и экономических соображений. Магнитолевитационные транспортные системы обычно реализуются в виде надземных систем электрического транспорта, хотя никаких ограничений по использованию этой технологии в другом исполнении нет. Более того использование этой технологии в метрополитене может обеспечить много преимуществ, в том числе уменьшение шума. Транспортные средства с магнитной левитацией имеют множество преимуществ по сравнению с обычной системой колес на рельсах:

- 1) устранение износа колес и рельсов с последующим снижением затрат на техническое обслуживание,
- 2) распределение веса транспортного средства снижает затраты на строительство путевой структуры,
- 3) повышается безопасность поскольку транспортное средство не может сойти с рельсов,

- 4) отсутствие колес снижает шум и вибрации,
- 5) уменьшается сопротивление движению в кривых,
- 7) снимаются ограничения по сцеплению при ускорении и торможении,
- 8) исключается механическая трансмиссия (редукторы, муфты, шестерни, цапфы, подшипники, и так далее,
- 9) система становится невосприимчива к погодным условиям.

В настоящее время можно предложить следующую классификацию направлений, по которым ведутся разработки новых видов наземного транспорта с магнитной левитацией различных типов и линейными двигателями.

#### **Системы магнитной левитации**

- на постоянных магнитах (PMS);
- электромагнитный подвес (EMS);
- комбинированные системы магнитного подвеса (HMS);
- электродинамический подвес (EDS).

Первые три целесообразны для недорогих низкоскоростных транспортных систем, потому что магниты, электромагниты и регуляторы, т. е. активные элементы системы расположены только на подвижном составе, а движущая и направляющая силы реализуются автоматически разницей магнитного сопротивления пассивной путевой балки. При этом в EMS существует два типа технологии левитации:

- 1) левитация и направляющая интегрированного типа, такие как японский HSST и корейский UTM и
- 2) левитация и направляющая разделенного типа, такие как немецкий Transrapid.

Последняя система (Transrapid) была разработана и для высокоскоростного движения, так как силы левитации и направляющие силы не связаны друг с другом, но количество регуляторов при этом увеличивается. Потребление электроэнергии интегрированного типа меньше, чем разделённого типа, но по мере увеличения скорости, взаимодействие между левитационной и направляющей силами увеличивается и в интегрированном типе становится трудно контролировать левитацию и направляющую силу одновременно.

#### **Линейный тяговый электропривод**

- линейные асинхронные двигатели;
- линейные синхронные двигатели;
- линейные индукторные двигатели;
- линейные двигатели постоянного тока.

Подвижной состав на магнитном подвесе получает движущую и тормозную силу от линейной тяговой машины, которая отличается от обычной вращающейся тяговой машины отсутствием использования механической передачи для прямолинейного движения. Существует два типа линейных машин: линейная асинхронная (индукционная) машина (LIM) и линейная синхронная машина (LSM). LSM в отличие от LIM имеет внутри себя отдельный источник намагничивающей силы. Взаимодействие между магнитным полем и токами якоря создает силу тяги. В соответствии с расположением якоря и индуктора магнитного поля существует два типа:

- 1) короткий тип (SP): катушки якоря на борту, а индуктор магнитного поля в пути;

2) длинный тип (LP): катушки статора в пути, а индуктор магнитного поля на борту.

Для типа LP, цена конструкции пути гораздо выше чем тип SP но для него не нужен токоприёмник для движения. На высоких скоростях обычно используется тип LP потому, что передача энергии, используя токоприёмник затруднена. Высокоскоростные поезда с магнитной левитацией предпочитают LSM, потому что он имеет более высокий коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, чем LIM. Экономически энергоэффективность особенно важна для высокоскоростной системы.

### Основные типы высокоскоростной магнитолевитационной транспортной технологии

В соответствии с изложенными физическими принципами магнитной левитации в настоящее время наибольшее развитие и разной степени внедрение получили три магнитолевитационные транспортные технологии — EMS «Transrapid» (Германия, Китай), EDS (Япония) и HMS «Inductrack» (США) (рис. 2).

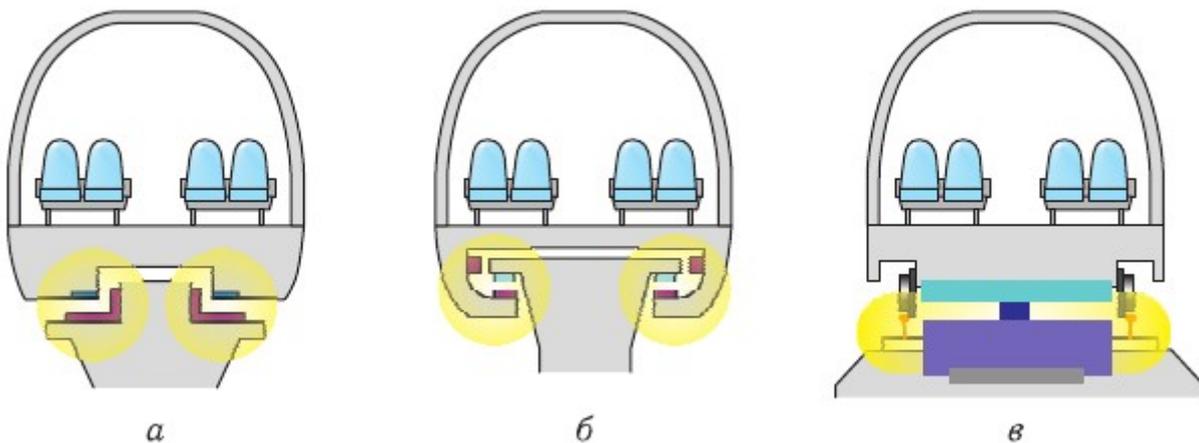


Рис. 2. Основные типы магнитолевитационной транспортной технологии: а — EDS ; б — EMS ; в — HMS

**Технология EDS** применяет сверхпроводниковые магниты. Это динамическая левитация, основанная на эффекте отталкивания магнита от токопроводящей шины. Рабочий зазор ~ 100 мм. Главный недостаток — высокая «начальная скорость левитации», при которой транспортное средство начинает левитировать, ~ 100 км/ч. Это практически не приемлемо для городского общественного транспорта.

**Технология EMS** применяет электромагниты (рис. 3). Левитация основана на эффекте притяжения электромагнита к феррорельсу. Рабочий зазор ~ 10 мм. Для вертикальной и боковой устойчивости необходимы контроль рабочего зазора и управление питанием электромагнита. Главный недостаток — малый рабочий зазор, усложняющий эксплуатацию транспортного средства в неблагоприятных климатических и погодных условиях.

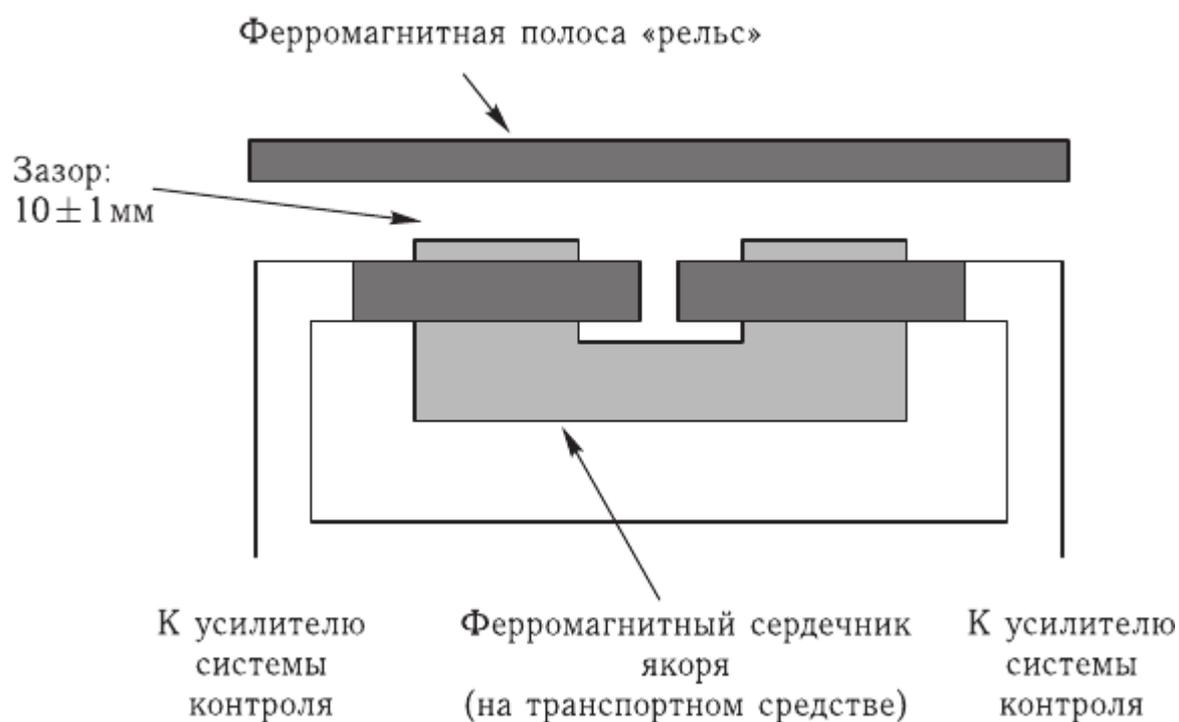


Рис. 3. Схема левитации технологии «Transrapid»

**Технология HMS** применяет постоянные магниты и треки из литцы или ламината. В ее сверхпроводниковой модификации — технологии «МагТранСити» (Россия) применяют массивные высокотемпературные сверхпроводники для левитации и боковой стабилизации, а сверхпроводниковые катушки — для тягового линейного синхронного двигателя.

## Системы EMS

В 2005 г. в Японии в префектуре Аичи в окрестностях города Нагоя для выставки «Экспо-2005» была построена линия «Maglev» под названием «Linimo» (рис. 4). Название «Linimo» производное от «линейный мотор», легко запоминающееся и отражающее содержание технологии. «Linimo» — первая коммерческая магнитолевитационная линия в Японии — работает для обслуживания местного населения и играет огромную роль в транспортной системе района. Поезда курсируют между станциями метро «Fujigaoka» и «Yakusa» на кольцевой линии «Aichi». Длина линии составляет 8,9 км, на линии девять станций. Скорость поезда может достигать 100 км/ч. Высота левитации 8 мм, минимальный радиус поворота 75 м, максимальный уклон 6 %. Поезда разработаны корпорацией «Chubu HSST» — оператором дороги, и построены компанией «Nippon Sharyo». Стоимость создания подвижного состава 380 млн долл. США, а путевой структуры — 575 млн долл. США. В удельном исчислении один километр пути обошелся примерно в 100 млн долл. США. Часть линии проходит под землей, а часть по эстакаде. Собственник «Linimo» — корпорация «HSST Development», акционерами которой являются «Japan Airlines» («Японские авиалинии»), «Nagoya Railroad» («Железная дорога Нагойи») и корпорация «Hazama Corporation» («Хацами»). Линия «Linimo» рассчитана на перевозку до 30 тыс. пассажиров в сутки в каждом направлении, на работу в условиях снега, обледенения и падающих листьев. Шумы и вибрации сведены к минимуму. Нагрузки на несущие опоры равномерно распределены по всей длине состава, в отличие от обычного рельсового транспорта, где они сосредоточены в местах расположения колесных пар. Это позволяет делать путепроводы уже, а опоры тоньше, т. е. появляется возможность экономить на капитальных затратах. Остановки на пути следования можно создавать внутри зданий, например внутри офисного, торгового центра или здания аэропорта.



Рис. 4.

Основные преимущества такой линии — не только высокая максимальная, но и средняя скорость, возможность прокладки в самых густонаселенных районах города. В пиковые часы пассажиропоток составляет порядка 4 тыс. чел./ч. Поезд длиной 43,3 м состоит из трех вагонов. Ширина вагонов 2600 мм, высота 3450 мм. Ширина проема дверей 1200 мм. Вместимость состава 244 пассажира (по 80 и 84 места на вагон). Из них сидячих мест 104 (по 24 и 36 сидячих мест на вагон). Кузов сделан из алюминиевого сплава. В головном вагоне поезда имеется дверь экстренного выхода. Все вагоны соединены общим проходом. Вторичный подвес пневматический. Бортовая система левитации и тяги состоит из обычных (несверхпроводниковых) электромагнитов в форме сердечника в виде латинской буквы «U». На каждый вагон приходится по 10 элементарных тяговых линейных асинхронных двигателей. Путьевые трехфазные обмотки тяговых линейных асинхронных двигателей питаются от преобразователей переменного напряжения и частоты. Контроллеры выполнены на биполярных транзисторах с изолированным затвором. Контактная сеть постоянного тока имеет напряжение 1,5 кВ. Штатная тормозная система электродинамическая, а экстренный тормоз гидравлический. В поезде есть машинист, хотя линия полностью автоматизирована. Автоматически контролируются следующие параметры: пуск, скорость, остановки, открытие дверей. Оборудование определения скорости состава осуществляет контроль через датчики, расположенные вдоль пути с шагом 30 мм и посылающие сигналы на две антенны, смонтированные под днищем состава, получающие и передающие данные по кабелю, расположенному в середине пути. Это позволяет системам сравнить реальную скорость состава с лимитом скорости и в случае необходимости активировать тормозные системы для снижения скорости. Станционное оборудование контроля за движением обеспечивает открытие дверей, которое осуществляется автоматически в случае полной остановки поезда в пределах 50 мм от требуемого места остановки. Оборудование для определения местоположения поезда тоже автоматическое. В случае открытия двери экстренного выхода питание контактного рельса автоматически отключается.

Поезд на магнитном подвесе, похожий на «Linimo», был также разработан компанией «Hyundai Rotem» (Южная Корея) для выставки 1993 г. в г. Даеджон с населением 1,5 млн человек. В 1997 г. последовала вторая версия этого поезда, а в 2004 г. «Hyundai Rotem» продемонстрировала третью версию на выставке «Иннотранс-2004» в Берлине. Сейчас этот поезд под названием «UTM-02» курсирует на линии длиной один километр. Поезд ходит до парка Науки в Даеджоне два раза в час в обоих направлениях в течение восьми часов в дневное время суток. Компания «Hyundai Rotem» является членом финансируемого правительством консорциума по разработке проекта линии «Maglev» в аэропорту «Incheon» (Сеул). Открытие линии состоялось в ноябре 2013 г. При строительстве этой линии использован опыт технологии «Linimo». Поезд (рис. 5) состоит из двух вагонов (по 20 т каждый) максимальной вместимостью 100 пассажиров. Максимальная скорость 110 км/ч. Силовое питание осуществляется от контактного рельса постоянного тока напряжением 1,5 кВ.



Рис. 5.

В настоящее время аналогичная технология используется в Китае. Это линия S1 Пекинского метрополитена (рис. 6 и 7).



Рис.6.



Рис. 7.

<https://youtu.be/iuBkQkfdT4>

## Принципиальная электрическая схема

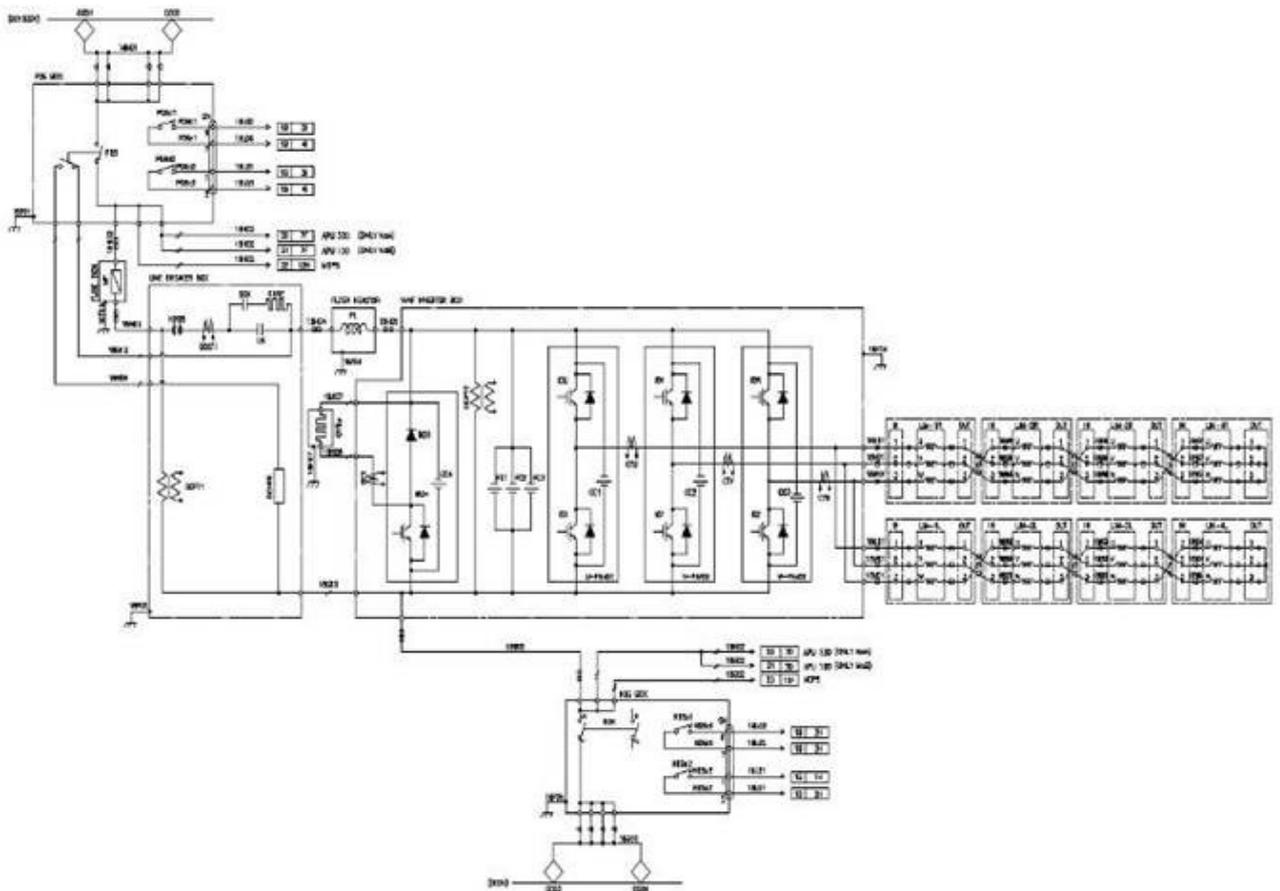


Рис. 8.

## Конструкция интегрального тягово-левитационного модуля

Размер постоянного магнита (ПМ) определяется возможностью левитации при максимальной нагрузке транспортного средства без дополнительного электропитания при заданном воздушном зазоре. Модель имеет реальные механические размеры для практического анализа. Технические характеристики и конструктивные параметры тягово-левитационного модуля (ТЛМ) приведены в таблице I. Он состоит из сердечника статора, в которой уложена обмотка якоря, и слайдера в магнитную систему которого встроены постоянные магниты и уложена регулирующая обмотка постоянного тока. Детальная структура ТЛМ для транспортного средства с магнитной подвеской показана на рис. 10. Для того чтобы получить стабильную левитацию, поток постоянного магнита должен корректироваться регулирующей обмоткой, уложенной вокруг постоянных магнитов. Стальные сердечники (статора и слайдера) шихтованные для уменьшения наведенных вихревых токов.

Таблица 1. Технические характеристики и конструктивные параметры интегрального ТЛМ

Слайдер		Статор	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Полюсное деление	312 мм	Полюсное деление	300 мм
Длина пакета	200 мм	Длина пакета	200 мм
Количество витков обмотки	112 витков	Количество витков обмотки	80 витков
Высота ПМ	25 мм	Высота паза	65 мм
Ширина ПМ	200 мм	Ширина паза	50 мм

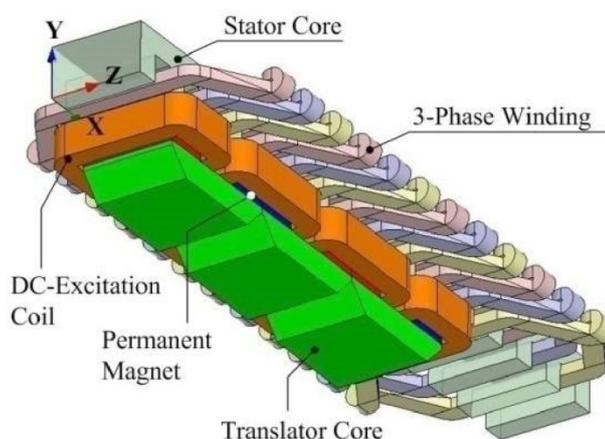


Рис. 10. Интегральный тягово-левитационный модуль для магнитно-левитируемого транспортного средства

Интегральный ТЛМ имеет силу левитации 8.77 кН при 20 мм воздушном зазоре и силу тяги 1.44 кН при намагничивающей силе якоря 3000А\*витков. В таблице 2 перечислены деталильные параметры ТЛМ, включая электрические параметры и материал постоянных магнитов.

Таблица 2. Параметры ЛТМ

Параметры	Значения
Сила левитации	8,77 кН (z=20мм)
Тяга	1,44 кН (3000А.витков)
Сопротивление катушки слайдера	0,5294 Ом
Индуктивность катушки слайдера	28,63 мГн
Сопротивление катушки якоря	0,2789 Ом
Индуктивность катушки якоря	14,52 мГн
Материал постоянных магнитов	Nd-Fe-B (N40SH)

Когда ток регулировочной катушки изменяется от -40А до +40А, максимальная плотность магнитного потока воздушного зазора показана на рис.11, можно видеть, что значение плотности магнитного потока воздушного зазора изменяется от 0,28 Т (-40А при z = 30 мм) до 1,00 Тл (+40А при z = 10 мм).

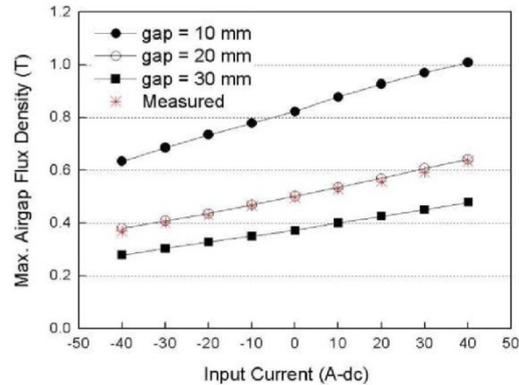


Рис.11. Плотность магнитного потока воздушного зазора в зависимости от тока регулировочной катушки при заданном воздушном зазоре

На рис.12 показана сила левитации в зависимости от величины воздушного зазора и тока регулировочной катушки. Видно, что номинальный воздушный зазор составляет 20 мм, когда ТЛМ имеет номинальную нагрузку 880 кг. Кроме того, на рисунке показано сравнение экспериментальных результатов и расчета 3-D FEM.

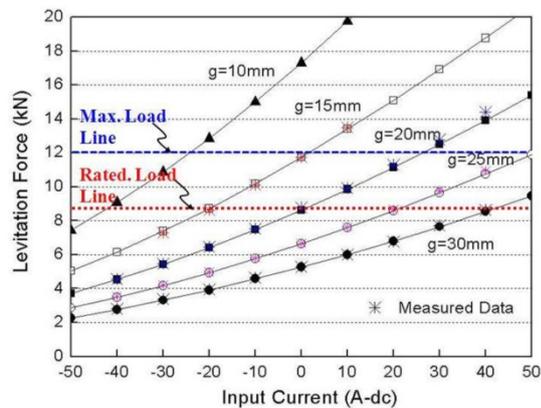


Рис.12. Подъёмная сила левитации в зависимости от тока регулировочной катушки при заданном воздушном зазоре

Гибридные тягово-левитационные модули состоят из шихтованных сердечников, высокопроводящих постоянных магнитов (ПМ) и управляющих токоведущих катушек без необходимости низкотемпературного жидкостного охлаждения. В модуле ПМ-ы используются для подвешивания общего веса левитируемого транспортного средства и его грузов. В системе магнитодвижущая сила, необходимая для электромагнитов, очень мала по сравнению с обычной электромагнитной системой (EMS). Мощность возбуждения и необходимое тепловыделение значительно ниже, чем только в системе левитации EMS. Таким образом, гибридный модуль приобретает более высокую степень свободы и может быть перенесен на концепции левитации с увеличенной величиной воздушного зазора и схемой управления с минимизированным потреблением энергии электромагнитом. На рис.13 показан базовый

гибридный тягово-левитационный модуль для транспортного средства на магнитной подвеске. В статоре открытые большие пазы адаптированы и предназначены для легкой установки односекционных катушек волновой формы. Большие пазы вызывают пульсацию тяги, что оказывает сильное влияние на динамический режим движущегося транспортного средства. В таблице 3 представлены технические характеристики гибридного тягово-левитационного модуля.

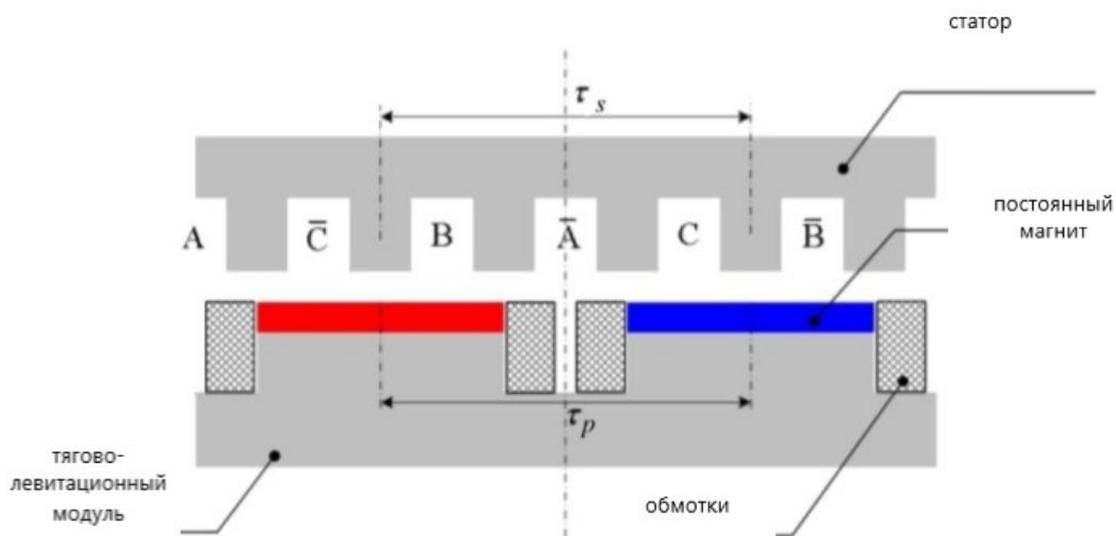


Рис.13. Базовый гибридный тягово-левитационный модуль

Таблица 3. Технические характеристики гибридного тягово-левитационного модуля

Название	Параметр	Значение
Тягово-левитационный модуль	Максимальная скорость установившегося движения	550 км/ч
	Номинальная длина воздушного зазора	20 мм
Статор	Полюса деления	300 мм
	Длина полюсов	200 мм
	Высота паза	65 мм
	Ширина паза	50 мм
	Количество полюса	12 штук
	Количество пазов на полюс	3 штуки
	Максимальный ток	3000 А <sub>макс</sub>
	Витки катушек	80 витков
Сердечник(Ротор)	Полюса деления	312 мм
	Длина полюсов	200 мм
	Витки катушек	112 витков
	Высота ПМ	25 мм
	Ширина ПМ	200 мм

На рис. 14 показан тягово-левитационный модуль двухполюсной электромагнитной системы с постоянным магнитом и без постоянных магнитов. Магнитный поток, обусловленный ПМ, который связывается с ферромагнитным модулем через шихтованный стальные сердечники и воздушные зазоры, создает силу притяжения между гибридным магнитным полюсом и статором. Эта сила притяжения обратно пропорциональна квадрату длины воздушного зазора в диапазоне фактической длины воздушного зазора.

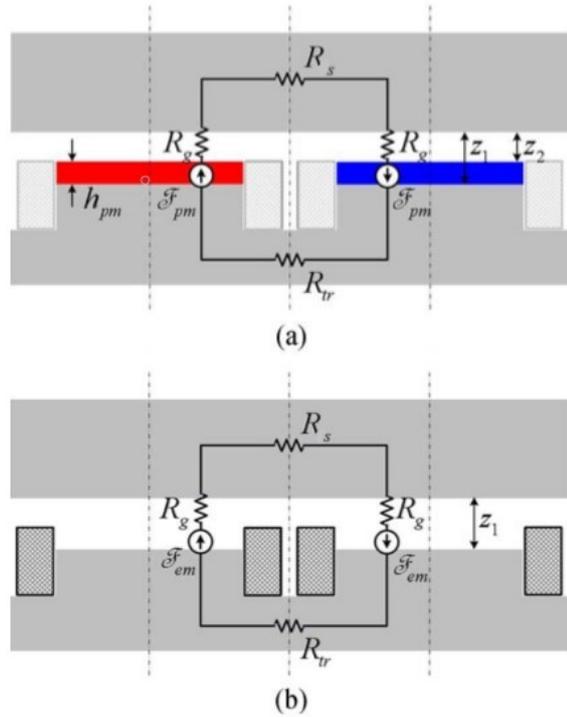


Рис.14. Тягово-левитационный модуль двухполюсной электромагнитной системы (а) с постоянным магнитом и (б) без постоянных магнитов.

На рис. 15 показана сила левитации гибридного тягово-левитационного модуля в зависимости от величины воздушного зазора.

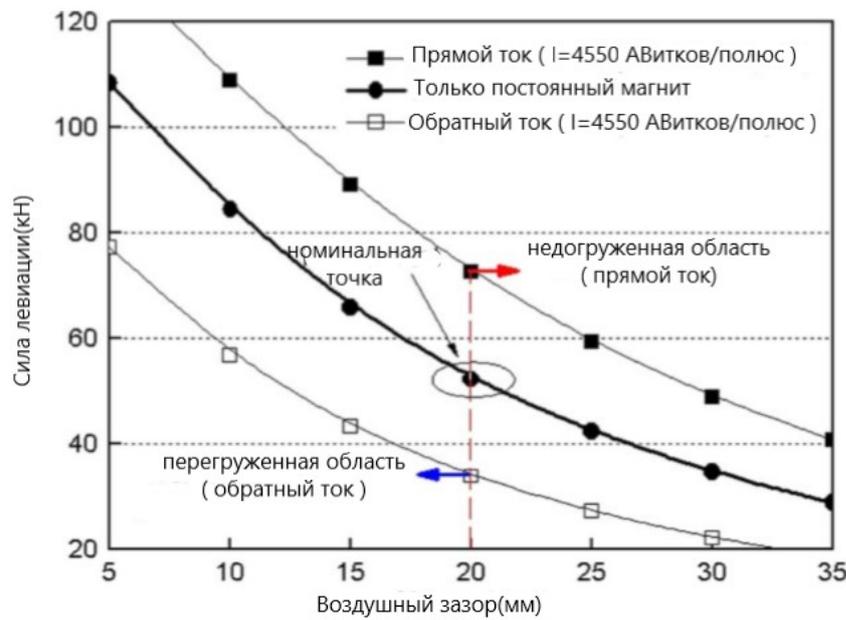


Рис.15. Сила левитации гибридного тягово-левитационного модуля в зависимости от величины воздушного зазора

## Моделирование в FEMM

Для иллюстрации и верификации предложенной структуры и электромагнитного явления проведено двумерное моделирование в FEMM. Мгновенная обратная ЭДС зависит от скорости транспортного средства и длины секции статора. На рис.16 показано распределение магнитного потока в сегментированном гибридном тягово-левитационном модули. В таблице 4 представлены параметры гибридного тягово-левитационного модули при работе машины с управлением левитацией нулевой мощности.

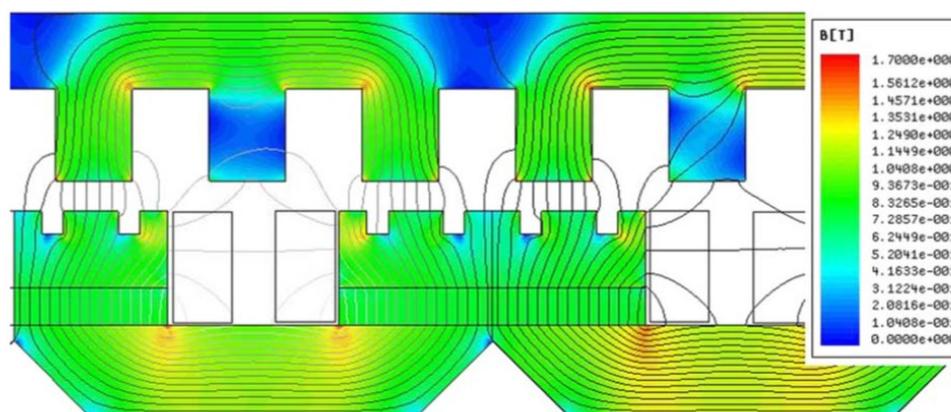


Рис. 16. Распределение магнитного потока в сегментированном гибридном тягово-левитационном модули.

Таблица 4. Параметры гибридного тягово-левитационного модули при работе машины с управлением левитацией нулевой мощности

Параметры	Значения
Сила левитации	8,77 кН ( $z=20\text{мм}$ )
Тяга	1,44 кН (3000 А.витков)
Сопротивление катушки слайдера	0,5294 Ом
Индуктивность катушки слайдера	28,63 мГн
Сопротивление катушки якоря	0,2789 Ом
Индуктивность катушки якоря	14,52 мГн
Материал постоянных магнитов	Nd-Fe-B (N40SH)



Рис. 17.

В Китае (Шанхай–аэропорт) в постоянном коммерческом режиме с 2004 г. также работает линия на электромагнитном подвесе (EMS второго типа) с линейным асинхронным двигателем (рис. 18). В процессе эксплуатации подтверждены высокие технико-экономические показатели конструкции.



Рис. 18. Шанхайский маглев.

Конструкция разработана немецким консорциумом, в который входят фирмы «TyssenKrupp» и «Siemens». Первая отвечала за ходовую часть, вторая — за всю электрическую составляющую. Китай изначально купил готовое решение вместе с лицензией на производство поездов «Transrapid». А в начале 2009 г. в ходе официального визита в Берлин премьера Госсовета Китая Вэнь Цзябао подписан целый ряд двусторонних экономических соглашений. В частности, немецкий консорциум, производящий скоростной поезд на магнитном подвесе «Transrapid», продал Китаю ключевые элементы технологии его изготовления. Китайцы, основываясь на приобретенном опыте, проектируют линии большей протяженности и конструируют подвижной состав для этих линий.

Строительство первого участка магистрали по технологии «Transrapid» началось в марте 2001 г., а 1 января 2004 г. была открыта линия, соединившая аэропорт Шанхая со станцией метро «Лонгянг». Оператором является компания «Shanghai Maglev Transportation Development». На линии протяженностью 30,5 км поезд развивает скорость 350 км/ч за две минуты (прохождение всей дистанции занимает около 8 мин), максимальная скорость, развиваемая на трассе, — 431 км/ч, поддерживается около 50 с, поскольку линия небольшой протяженности со сложным профилем. В 2003 г. поезд в испытательном режиме развил скорость 501 км/ч.

В магнитолевитационной транспортной технологии «Transrapid» (Мюнхен, ФРГ; Шанхай, КНР) тяговый линейный электропривод выполнен на базе обычного, не сверхпроводникового линейного синхронного электродвигателя, который обеспечивает штатное и аварийное торможение в режиме рекуперации энергии в питающую сеть. Статор располагается на путевом полотне. Он состоит из пакетов электротехнической стали, в пазах которых установлена трехфазная обмотка, выполненная из многожильного медного кабеля. Шихтованный магнитопровод смонтирован на внутренней стороне путевого полотна. Обмотка возбуждения ротора-бегуна работает на постоянном токе, который подается

к ней от бортового источника питания. Тяговое усилие возникает в результате взаимодействия бегущего магнитного поля статора и постоянного магнитного поля обмотки возбуждения ротора-бегуна. Скорость транспортного средства и тяговое усилие регулируются путем изменения частоты и амплитуды трехфазного тока, подаваемого в обмотку статора от наземной силовой сети (рис. 19). Регулирование скорости транспортного средства в диапазоне 0–500 км/ч происходит плавно, без ступеней. Электромагнитное торможение осуществляется путем переключения фаз путевой трехфазной обмотки статора. В результате этого направление действия силы тяги становится противоположным.

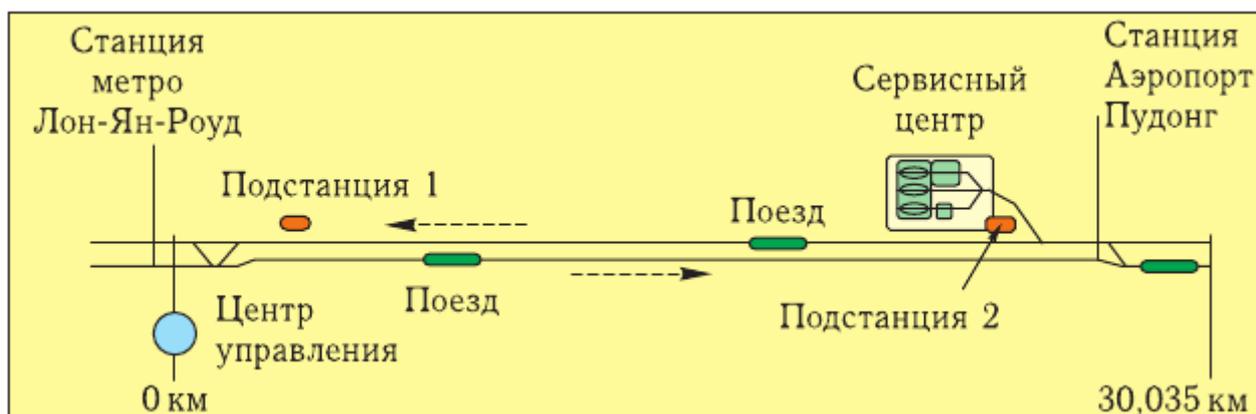


Рис. 19. Магнитолевитационная дорога в Шанхае (КНР) по технологии «Transrapid»

Бортовые электромагниты, обеспечивающие левитацию и боковую стабилизацию транспортного средства, установлены в боковых камерах несущей тележки (рис. 20). За счет силы притяжения (снизу) между транспортным средством и путевым полотном поддерживается эксплуатационный (рабочий) зазор ~ 10 мм. Электронная система регулирования тока бортовых электромагнитов левитации и боковой стабилизации, снабженная датчиками измерения зазора и обратной связью, обеспечивает стабильную левитацию и удержание транспортного средства по курсу.



Рис. 20. Полномасштабное устройство левитации и линейной тяги по технологии «Transrapid»

Вдоль магнитолевитационной дороги размещены тяговые подстанции (рис. 21). Автоматическая система радиосвязи обеспечивает контроль и управление последовательным подключением секций путевой трехфазной обмотки к силовой питающей сети.

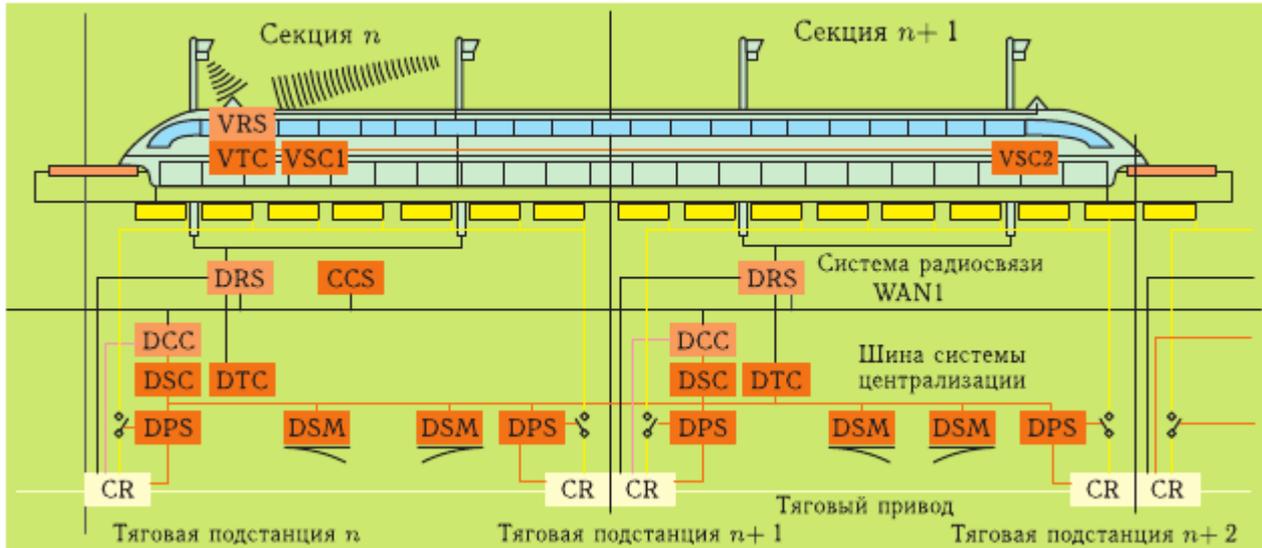


Рис. 21. Схема радиосвязи и силовой сети

В настоящее время в Китае ведутся работы по усовершенствованию технологии «Transrapid» для расширения сети высокоскоростных дорог (рис. 22-25).



Рис. 22.



Рис. 23.



Рис. 24.



Рис. 25.

## **Системы EDS**

Японский высокоскоростной «Maglev» ( рис. 26 и 27) использует принцип электродинамической левитации (EDS). На борту транспортного средства установлены сверхпроводниковые катушки системы левитации и боковой стабилизации, магнитное поле которых во время движения транспортного средства взаимодействует с активной путевой структурой. Схематические изображения систем левитации и боковой стабилизации, а также системы тяги приведены на рис. 28 и 29.



Рис. 26.

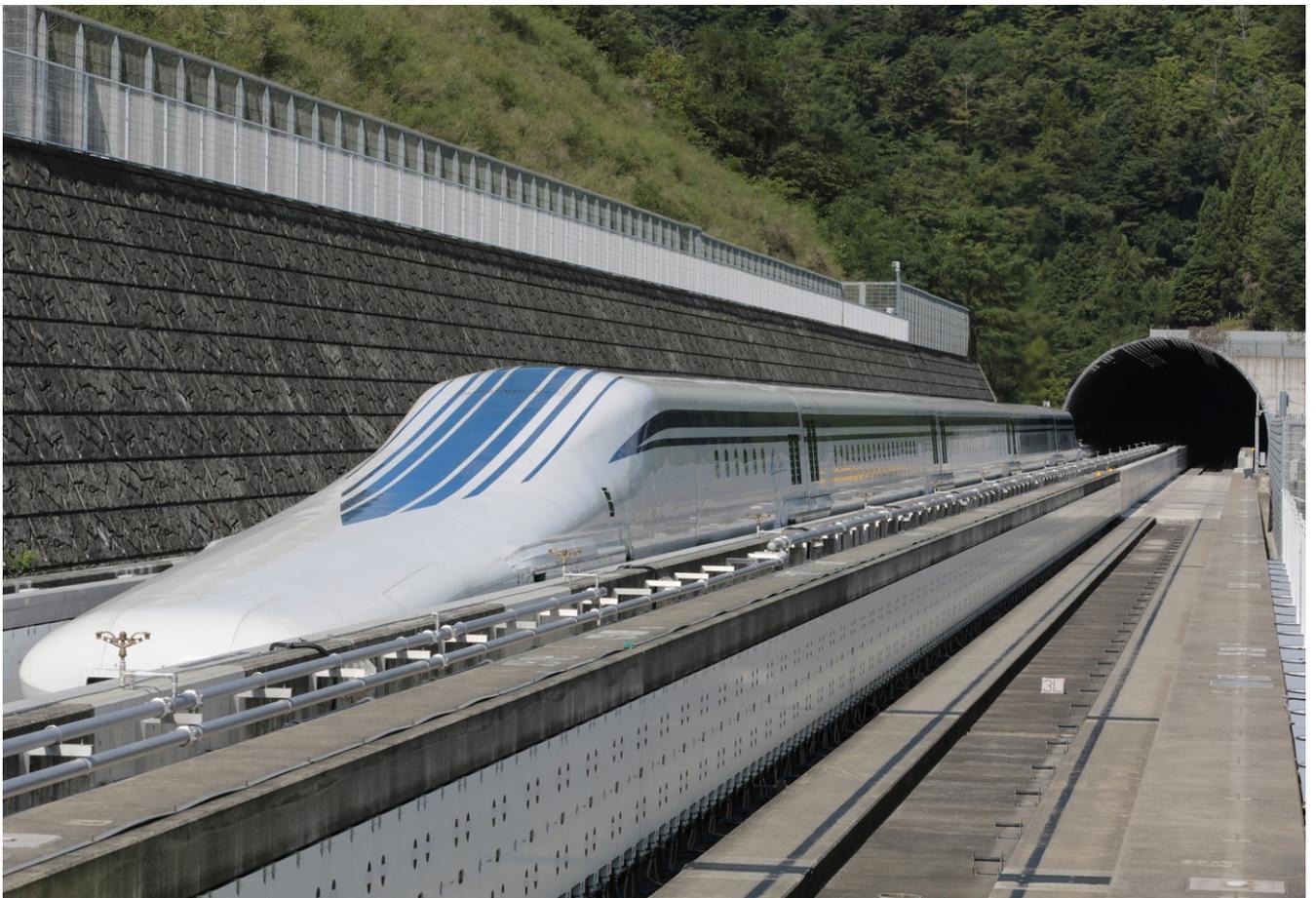


Рис. 27.

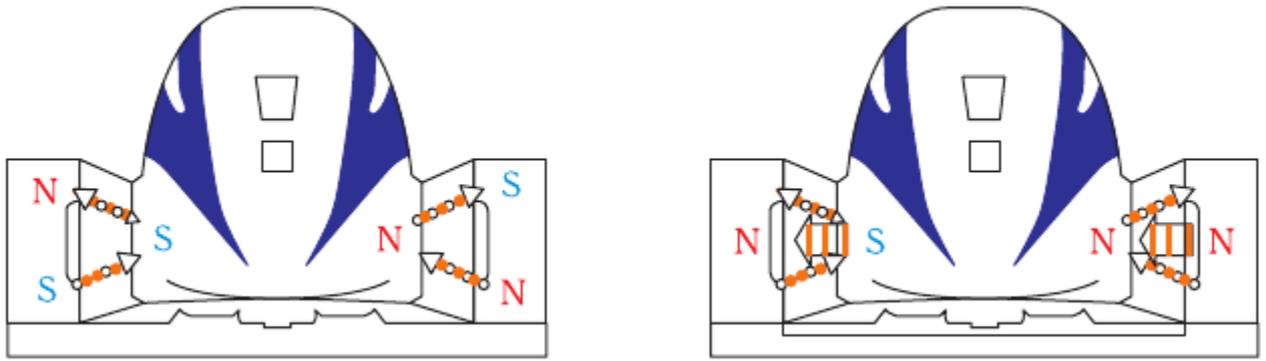


Рис. 28. Системы левитации (слева) и стабилизации (справа). Фронтальный вид.

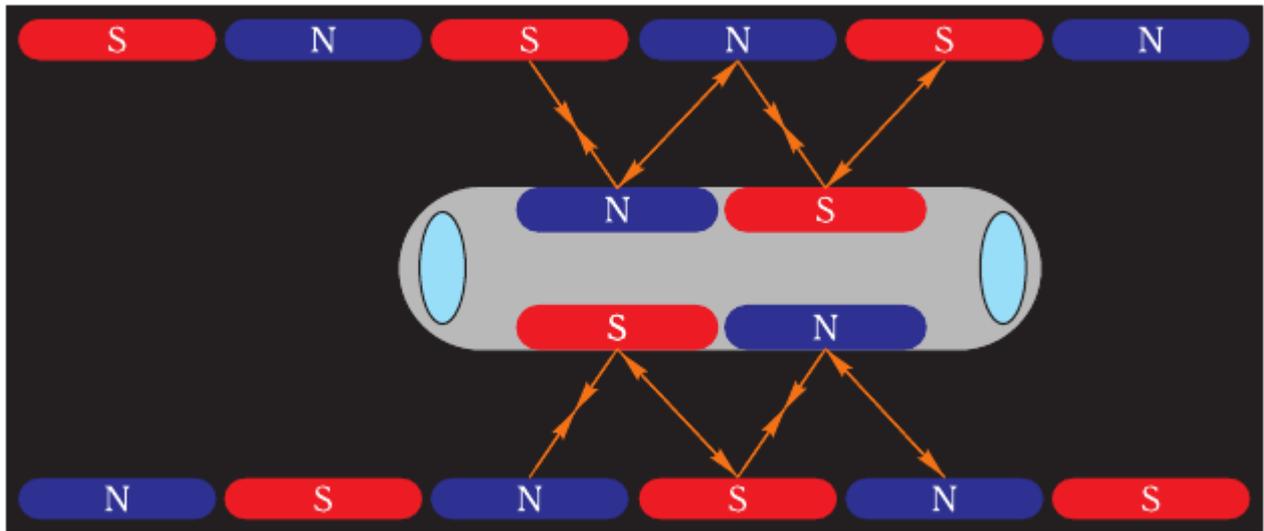


Рис. 29. Система тяги. Вид сверху

Система электродинамической левитации (технология «Maglev») имеет преимущества перед системой электромагнитной левитации (технология «Transrapid»), поскольку позволяет поднять транспортное средство выше над путевой структурой. Однако при использовании системы электродинамической левитации транспортному средству необходимы колеса, на которых оно перемещается на низких скоростях (менее 100 км/ч). Кроме того, система электродинамической левитации может быть эффективной только при использовании сверхпроводниковых магнитов, которые требуют бортового криогенного обеспечения.



Рис. 30. Боковые стены пути высокоскоростной системы EDS в Японии.

На готовом участке испытательного полигона применена путевая структура с направляющими трех типов — панельными, балочными и с непосредственным креплением. В панельном варианте путевые обмотки заделаны в бетонные панели, выполненные на все поперечное сечение путевой структуры, при их изготовлении на заводе. В балочном варианте нижнее полотно и боковые стенки путевой структуры выполнены отдельными и собираются воедино при укладке пути. Обмотки заделаны в боковые стенки в заводских условиях. В варианте с непосредственным креплением обмотки навешиваются на месте во время укладки активной путевой структуры. Путевые обмотки изготовлены из алюминия и имеют пластиковую изоляцию. В отличие от предыдущих моделей, где путевые обмотки были двухслойными, в последней модификации они выполнены однослойными. В одном из двух вариантов обмотка выполняет функции тяговой и левитационно-стабилизационной катушки. При использовании такого рода «интегральных» обмоток можно уменьшить их количество. В другом варианте применена путевая тяговая обмотка кабельного типа (рис. 31), которая позволяет снизить расходы на ее производство благодаря использованию силового кабеля. Испытания путевой обмотки, состоящей из кабельных катушек, подтвердили ее надежность. Так как для изготовления катушек использовался кабель из транспонированных проводов, удалось снизить потери на вихревые токи. Кроме того, кабельные катушки дешевле и легче в обслуживании, поскольку они имеют минимальное число контактных соединений.

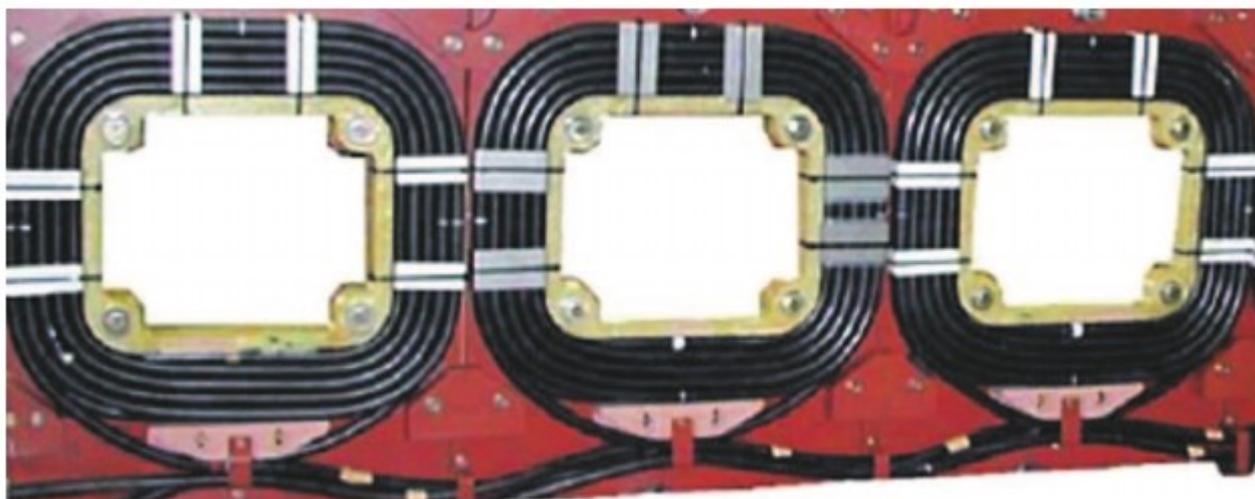


Рис. 31. Катушка кабельного типа, созданная в Японии для усовершенствования системы EDS

Новый силовой преобразователь позволил снизить стоимость строительства активной путевой структуры. Состоит он из нового обратного преобразователя на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором и увеличенной инжекцией (IEGT). Это позволило уменьшить на две трети электрические потери и вдвое размеры оборудования по сравнению с преобразователями на запираемых тиристорах (GTO). Данный преобразователь, используемый на полигоне в Яманаше с 2002 г., работает без рекламаций.

Общий пробег поезда уже к концу 2004 г. достиг 428 тыс. км, примерно по 70 тыс. км в год. Поскольку восьмилетний срок эксплуатации не гарантирует полновесность проверки надежности путевой обмотки и другого оборудования, то проводились эталонные испытания. Полученные экспериментальные данные в совокупности с ресурсными испытаниями подтвердили возможность использования данного оборудования в условиях коммерческой эксплуатации. Центральная японская железная дорога планирует открытие к 2027 г. линии «Maglev» от Токио до Осаки, а существующий испытательный путь в Яманаше станет частью этой дороги. Общая длина трассы составит 450 км, наибольшая скорость будет составлять 581 км/ч.

## Системы HMDS

Технология «Inductrack» является альтернативным типом магнитодинамической левитации (рис. 32), в которой используются постоянные магниты, установленные по схеме «массива Хальбаха». «Массив Хальбаха» позволяет примерно вдвое увеличить магнитную индукцию поля в рабочем зазоре и существенно снизить поле рассеяния. На базе «массивов Хальбаха» можно также реализовать магнитостатическую левитацию. В этом случае кроме транспортного средства постоянные магниты должны быть установлены и на путевом полотне (см. рис. 33 б). Достоинства технологии «Inductrack» состоят в том, что зазор может достигать 100 мм (см. рис. 33 б), а для работы магнитов не требуется криогенное охлаждение. Вместе с тем, технология «Inductrack» предполагает использование вспомогательных колес на участках разгона, торможения и остановки транспортного средства. В технологии «Inductrack» требуется размещение на путевом полотне трека из вертикальных короткозамкнутых катушек или плоских электропроводящих контуров из литцы или ламината (см. ниже). Тягу обеспечивает линейный синхронный двигатель, бортовая система возбуждения которого может состоять из «массивов Хальбаха». Вертикальные путевые короткозамкнутые катушки левитации практически не имеют магнитной связи с путевой трехфазной обмоткой линейного синхронного двигателя. Так как рабочий зазор достаточно велик, то для обеспечения устойчивой левитации не

требуется сложной системы управления с обратной связью, отслеживающей изменение зазора. В магнитолевитационной технологии «Inductrack» гибридное путевое полотно состоит из традиционного рельсового пути, дополненного путевой трехфазной обмоткой тягового линейного синхронного двигателя, а также путевыми короткозамкнутыми катушками (магнитодинамическая левитация) или «массивами Хальбаха» (магнитоэстатическая левитация) (рис. 33).

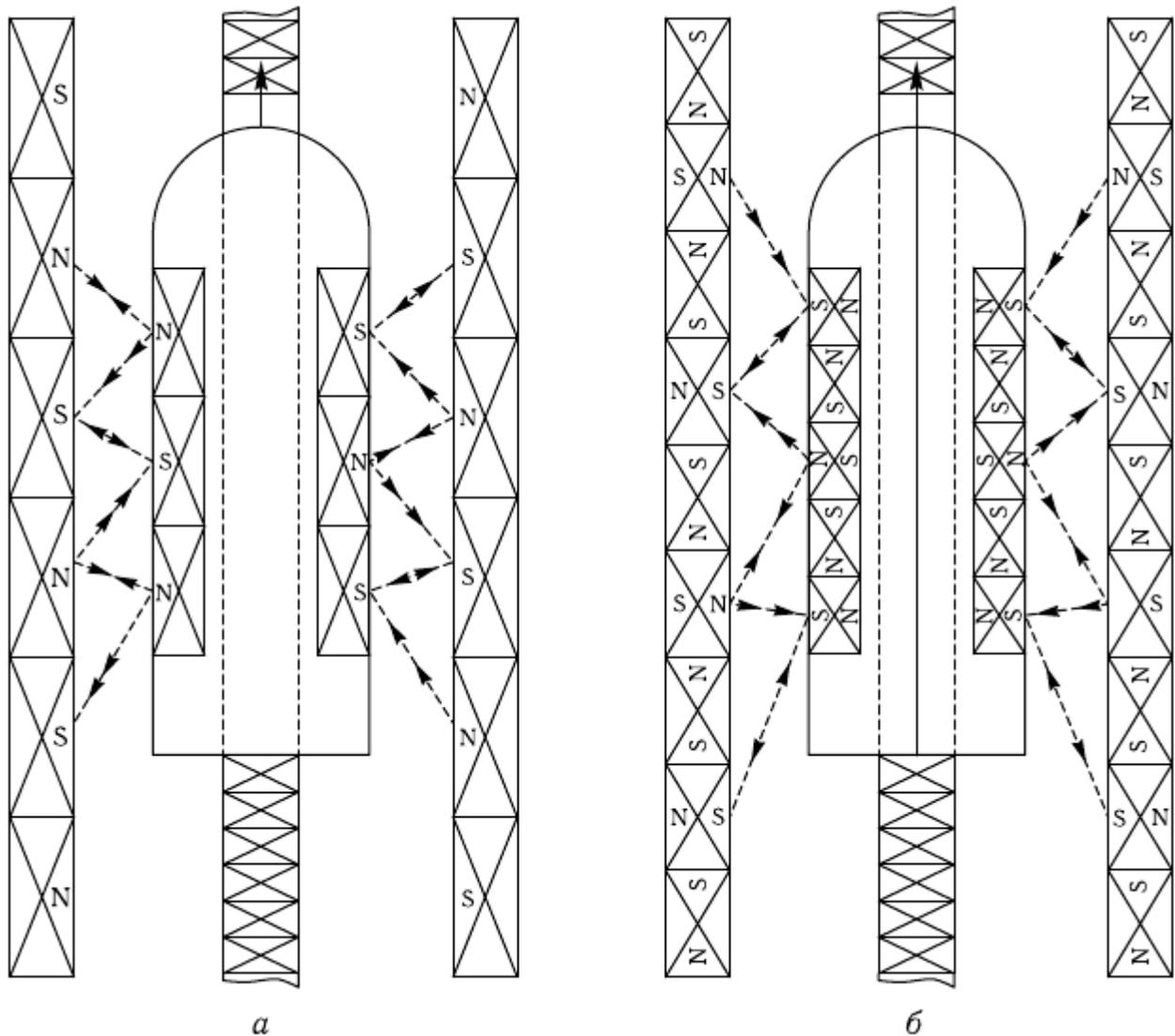


Рис. 32. Схемы левитации, боковой стабилизации и тяги различных технологий: а — технология «Maglev» (The Railway Technical Research Institute (RTRI), Tokyo, Japan); б — технология «Inductrack» с «массивами Хальбаха» из постоянных магнитов

На стоянке, участках разгона, штатного или экстренного торможения транспортного средства используются рельсы и колеса (рис. 33 а). На левитационном участке (рис. 33 в) колеса не касаются путевого полотна. При движении «массива Хальбаха» в путевых короткозамкнутых катушках наводятся токи, в результате чего возникает сила левитации. Применение «массива Хальбаха» в технологии «Inductrack» обеспечивает наиболее эффективную левитацию, а кроме того, боковую устойчивость транспортного средства. Так как магнитное поле рассеяния весьма мало, то существенно снижаются затраты на его экранирование.

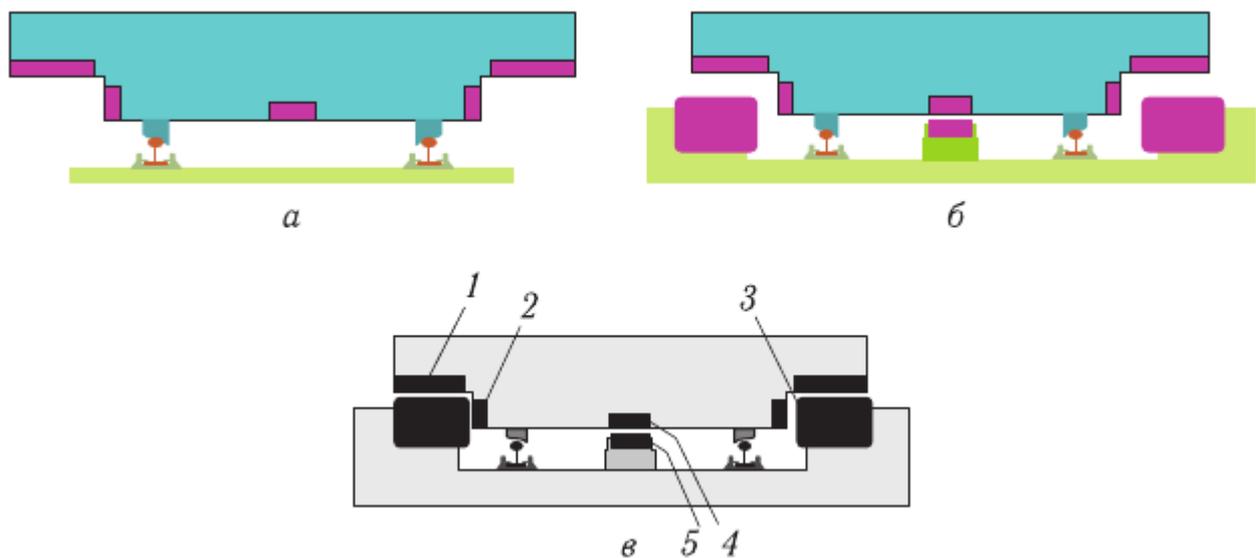


Рис. 33. Схема магнитной левитации и боковой стабилизации типа «Inductrack» на основе «массива Хальбаха». Этапы движения транспортного средства по гибридной дороге (ж/д + маглев): а — старт транспортного средства на рельсовом ж/д полотне; б — въезд на магнитолевитационный участок ж/д полотна; в — движение на магнитолевитационном участке ж/д полотна: 1 — «массивы Хальбаха» левитации; 2 — «массивы Хальбаха» боковой стабилизации; 3 — путевая короткозамкнутая катушка левитации; 4 — «массивы Хальбаха» ротора-бегуна линейного синхронного двигателя; 5 — путевая трехфазная обмотка линейного синхронного двигателя

Согласно рис. 34, горизонтальная составляющая магнитного поля 3 наводит в вертикально расположенных путевых короткозамкнутых катушках 4 ток, который, взаимодействуя с магнитным полем, создает подъемную силу. Вертикальное положение, в отличие горизонтального, позволяет разместить гораздо большее число короткозамкнутых катушек левитации 4. В результате появляется возможность в несколько раз увеличить подъемную силу и достигнуть рабочих зазоров, сопоставимых с теми, которые свойственны традиционной динамической системе левитации в технологии «Maglev». Однако традиционная динамическая система левитации обеспечивает большой рабочий зазор при скоростях движения транспортного средства  $\sim 100$  км/ч. В технологии «Inductrack» большой рабочий зазор достигается при гораздо меньших скоростях.

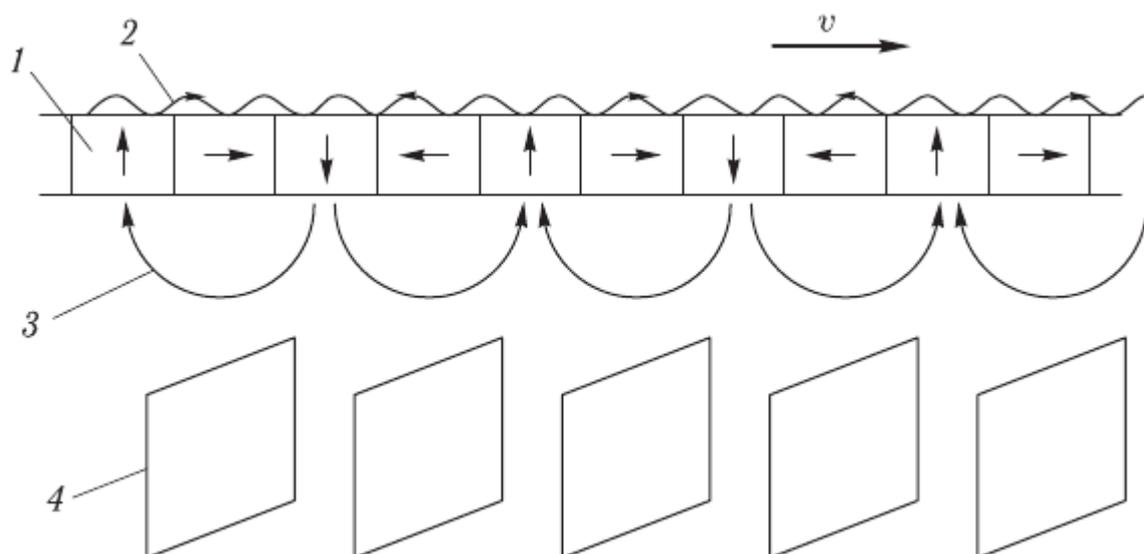


Рис. 34. Схематическое изображение магнитолевитационной дороги на основе системы «Inductrack»: 1 — «массив Хальбаха»; 2 — магнитное поле рассеяния; 3 — магнитное поле в рабочем зазоре; 4 — путевые короткозамкнутые катушки левитации

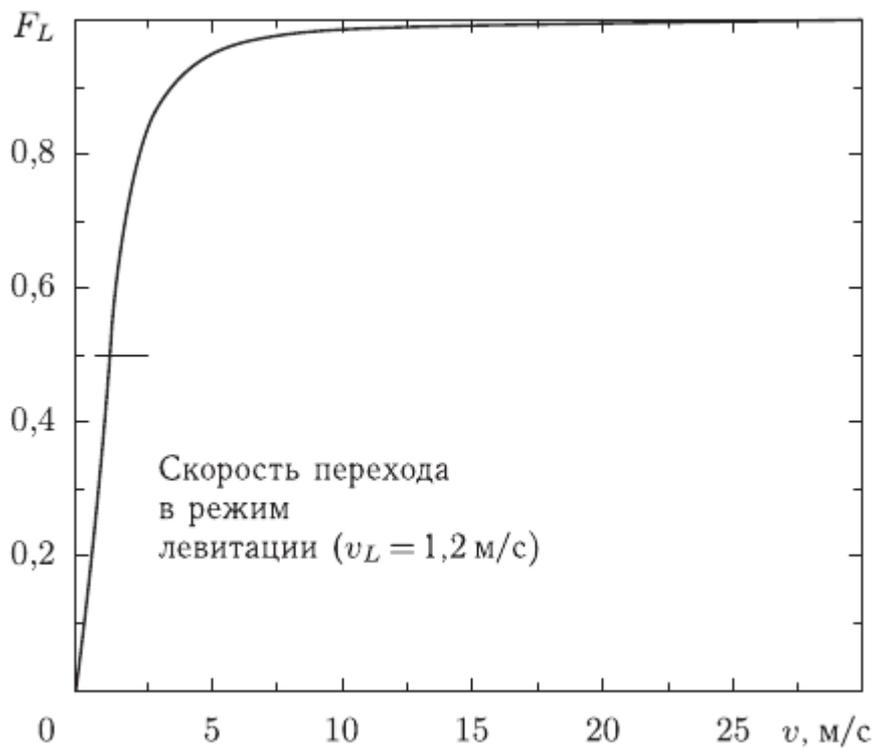


Рис. 35. Зависимость силы левитации  $F_L$  от скорости  $v$  транспортного средства

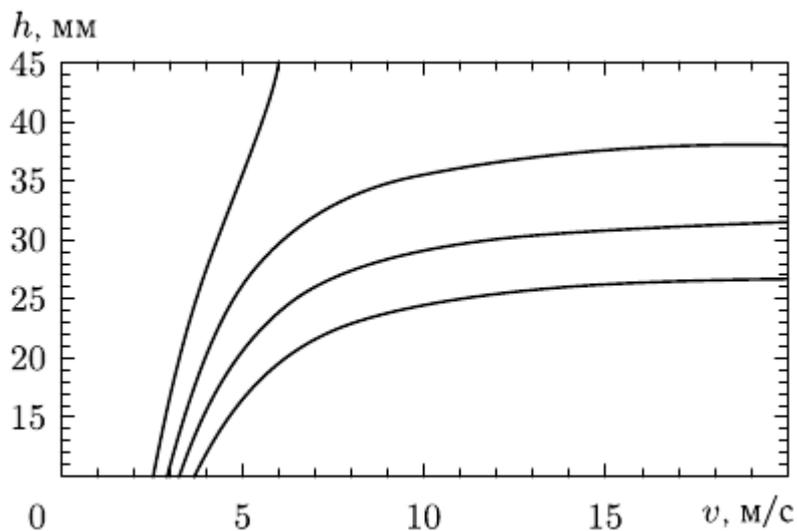


Рис. 36. Зависимость высоты зазора  $h$  от скорости  $v$  транспортного средства при различной левитационной нагрузке: сверху вниз: 180 кН, 200 кН, 220 кН и 240 кН

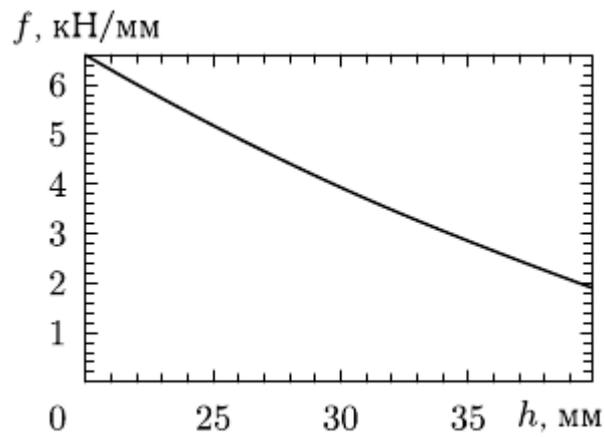


Рис. 37. Зависимость жесткости  $f$  левитационной системы от высоты  $h$  рабочего зазора. Скорость транспортного средства  $v = 15$  м/с (54 км/ч)

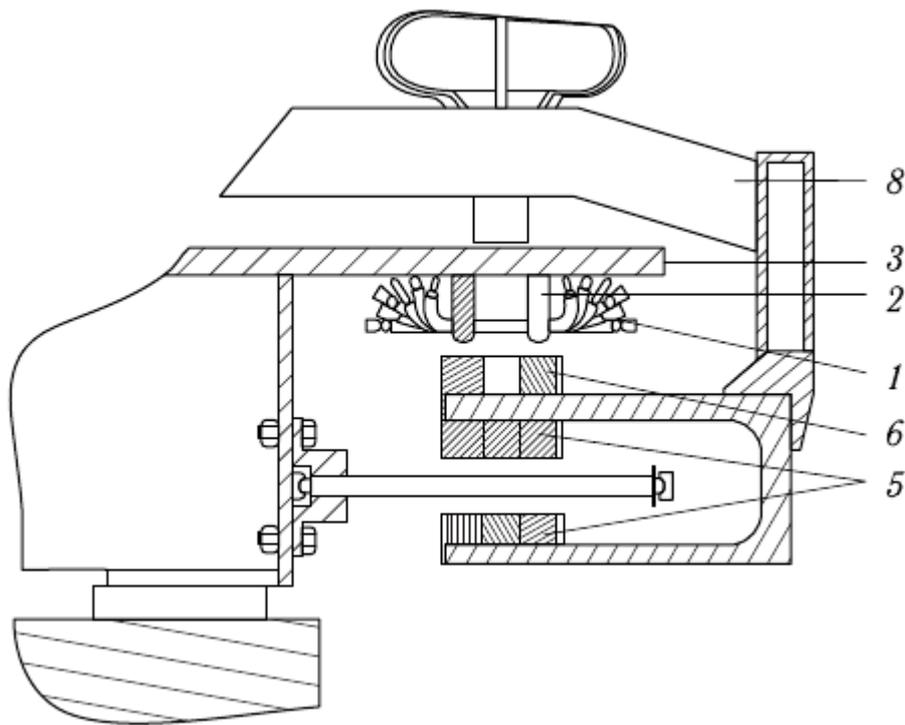


Рис. 38. Эскиз активной путевой структуры и транспортного средства: 1 — трехфазная путевая обмотка линейного синхронного двигателя; 2 — шихтованный ферромагнитный сердечник; 3 — путевая дорожка для вспомогательных колес; 4 — два «массива Хальбаха» системы левитации; 5 — «массив Хальбаха» системы возбуждения линейного синхронного двигателя; 6 — «массив Хальбаха» системы возбуждения линейного синхронного двигателя; 7 — «массив Хальбаха» системы возбуждения линейного синхронного двигателя; 8 — несущая конструкция тележки транспортного средства

## Магнитостатическая левитация на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников

По теореме Ирншоу (1839 г.), если в статическом поле сила взаимодействия свободных тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, то устойчивое равновесие невозможно. Спустя 100 лет В. Браунбек теоретически и экспериментально доказал, что равновесие в постоянном

магнитном поле может быть устойчивым, если подвешиваемые тела обладают диамагнитными или сверхпроводящими свойствами. Благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда сверхпроводник проявляет свойства идеального диамагнетика и может быть подвешен в постоянном магнитном поле благодаря возникновению потенциальной ямы с минимумом электромагнитной энергии. Однако во всех остальных случаях (без сверхпроводников) устойчивость магнитного подвеса может быть достигнута только автоматическим регулированием магнитного поля с использованием обратной связи с датчиками положения подвешиваемого тела. Такие магнитные подвесы являются активными, так как требуют перманентного отслеживания положения подвешиваемого тела и соответствующего изменения тока в электромагните. Магнитрезонансные подвесы с пассивной системой регулирования, основанной на резонансных свойствах колебательных контуров, в силу специфики, не перспективны в магнитолевитационной транспортной технологии. Особые свойства электромагнитного подвеса проявляют массивные (синоним: объемные) высокотемпературные сверхпроводники. Любой сверхпроводник, в том числе высокотемпературный, благодаря эффекту Мейсснера-Оксенфельда экранирует внешнее магнитное поле, и поэтому отталкивается от постоянного магнита. Сверхпроводник, находящийся в «мейсснеровском» состоянии, которое не зависит от магнитной предыстории, полностью выталкивает из своего объема внешнее магнитное поле (в данном случае генерируемое постоянным магнитом). Сверхпроводнику в мейсснеровском состоянии свойственны наиболее высокие левитационные свойства. Сверхпроводник в мейсснеровском состоянии является идеальным диамагнетиком и поэтому обладает устойчивой левитацией. Это становится ясным из рис. 39, где показана качественная картина потенциальной ямы, образованной замкнутыми (вне постоянного магнита) силовыми линиями магнитного поля, созданного экранирующими токами. Однако наибольший вклад в устойчивость левитирующей системы «массивный высокотемпературный сверхпроводник и постоянный магнит» вносит эффект частичного проникновения и захвата магнитного потока центрами пиннинга в высоко- температурном сверхпроводнике (общие силовые линии для магнита и сверхпроводника), который относится к сверхпроводникам 2-го рода. Вместе с тем, при частичном проникновении внешнего магнитного поля в сверхпроводник его экранирующие, а значит, и левитационные качества ухудшаются. В любом случае такой системе левитации устойчивое состояние внутренне присуще.

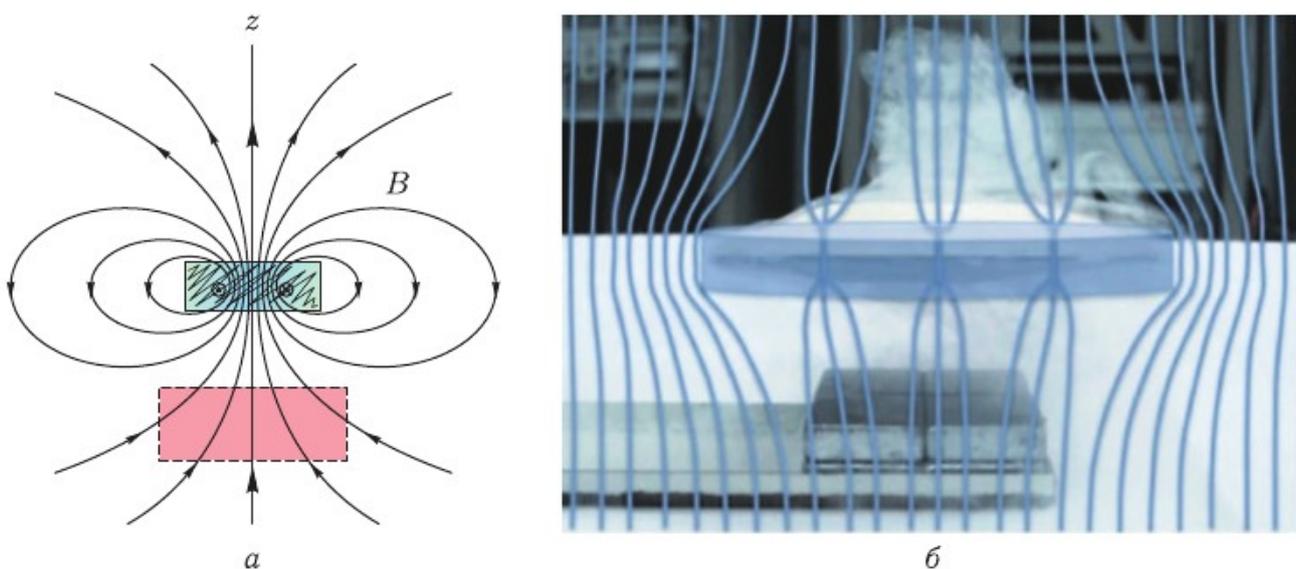


Рис. 39. Левитация массивного высокотемпературного сверхпроводника (вверху) над постоянным магнитом (внизу)



Рис. 40. Криогенные левитационные катушки.

Поскольку устойчивость левитационной системы обеспечивается в основном за счет захвата магнитного потока центрами пиннинга, состояние равновесия системы зависит от магнитной предыстории. На рис. 39 а схематически изображено силовое поле постоянного магнита — незамкнутые в пределах рисунка линии — и поле экранирующих токов массивного высокотемпературного сверхпроводника — замкнутые линии. При активации (синоним: намагничивании) массивного высокотемпературного сверхпроводника, например, в режиме «field cooling process» («fc-процесс») силовые линии магнитного поля оказываются «вмороженными» в него. В отсутствие смещения массивного высокотемпературного сверхпроводника относительно начального положения в нем протекают только сверхпроводящие экранирующие токи. Его взаимодействие с постоянным магнитом создает силу левитации. При вертикальном смещении массивного высокотемпературного сверхпроводника, независимо от направления, «вмороженное» магнитное поле в объеме высокотемпературного сверхпроводника остается неизменным. В то же время внешнее магнитное поле деформируется. Это приводит к наведению дополнительных экранирующих сверхпроводящих токов, направление которых зависит от направления вертикального смещения. В результате такого процесса обеспечивается стабильность левитации по вертикали. Если внешняя возмущающая сила действует в поперечном направлении, то в массивном высокотемпературном сверхпроводнике наводятся дополнительные экранирующие сверхпроводящие токи, препятствующие его поперечному смещению. Наибольший вклад в поперечную стабилизацию массивного высокотемпературного сверхпроводника вносят «вмороженные» в него силовые линии магнитного поля. Поперечная возмущающая сила деформирует «вмороженное» магнитное поле, создавая градиент магнитного давления, которое стремится восстановить первоначальное равновесие. Таким образом, в системе магнитостатической левитации с массивными высокотемпературными сверхпроводниками обеспечивается эффективная вертикальная и поперечная стабилизация. Известно, что любая система стремится занять положение с наименьшей энергией. Поэтому после внешнего силового возмущения (если оно не превышает предел, свойственный данной системе левитирующих тел) массивный

высокотемпературный сверхпроводник возвращается в исходное устойчивое положение. Однако если указанный выше предел превышен, высокотемпературный сверхпроводник займет другое, отличное от первого, но тоже устойчивое положение. Это связано с тем, что силовые линии магнитного поля, проникшего в сверхпроводник, могут перераспределяться. Фактически речь идет о квантованных нитях магнитного потока, которые могут перескакивать от одного центра пиннинга к другому и т. д. В реальных условиях это имеет место при вертикальном и боковом колебании положения транспортного средства. Если магнитное поле экранирующих токов вызывает отталкивание, то магнитное поле, проникшее в сверхпроводник, наоборот, создает притяжение. Обычная магнитная левитация работает или на притяжении или на отталкивании. Система левитации на базе массивных высокотемпературных сверхпроводников не зависит от полярности магнитов — она безразлична к взаимной ориентации силовых линий магнита и силы тяжести: пара магнит–сверхпроводник сохраняет исходное взаимное расположение и заданный зазор.