



УДК 621.313.1

**Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев, Е. И. Морозова**Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛЕВИТАЦИИ  
И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ГРУЗОВОЙ  
ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Узел левитации грузовой транспортной платформы рассматривается как асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором обращенного исполнения. Бортовая магнитная система представляет собой обмотку статора с явно выраженными полюсами. Короткозамкнутой обмоткой ротора служит путевая трековая обмотка – катушка Грамма, беличья клетка, сплошная или перфорированная реактивная шина. Основные теоретические положения и расчетные формулы, разработанные для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, адаптированы для описания работы узла левитации. На основании сравнительного анализа электромагнитных процессов предложены наилучшие варианты исполнения путевых треков левитации и боковой стабилизации в виде поперечных кольцевых обмоток Грамма или распределенных беличьих клеток.

магнитная левитация, электродинамическое торможение, грузовой транспорт, асинхронный двигатель, беличья клетка.

**Введение**

Если использовать аналогию с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, то в устройстве левитации бортовая магнитная система представляет собой обмотку статора [1]. В ней явно выраженные полюса имеют чередующуюся полярность и состоят из сверхпроводниковых катушек или постоянных магнитов. Роль короткозамкнутой обмотки ротора выполняет беличья клетка, короткозамкнутые витки которой развернуты вдоль путепровода, либо реактивная шина – сплошная или с поперечными прорезями (рис. 1).

Узел левитации схож с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором не только по элементам конструкции, но и по физиче-

ским процессам и режимам работы. Поэтому основные теоретические положения, разработанные для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, и соответствующие расчетные формулы могут быть применены для описания работы узла левитации. Прежде всего, это касается развиваемого устройством левитации электромагнитного момента, который в рассматриваемом случае является тормозным. При этом – поскольку путевая трековая обмотка неподвижно закреплена – протекающие в устройстве левитации процессы схожи с теми, которые происходят в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором, находящимся в заторможенном состоянии.

Задача состоит в том, чтобы адаптировать известные из теории асинхронных машин расчетные соотношения для описания эффек-

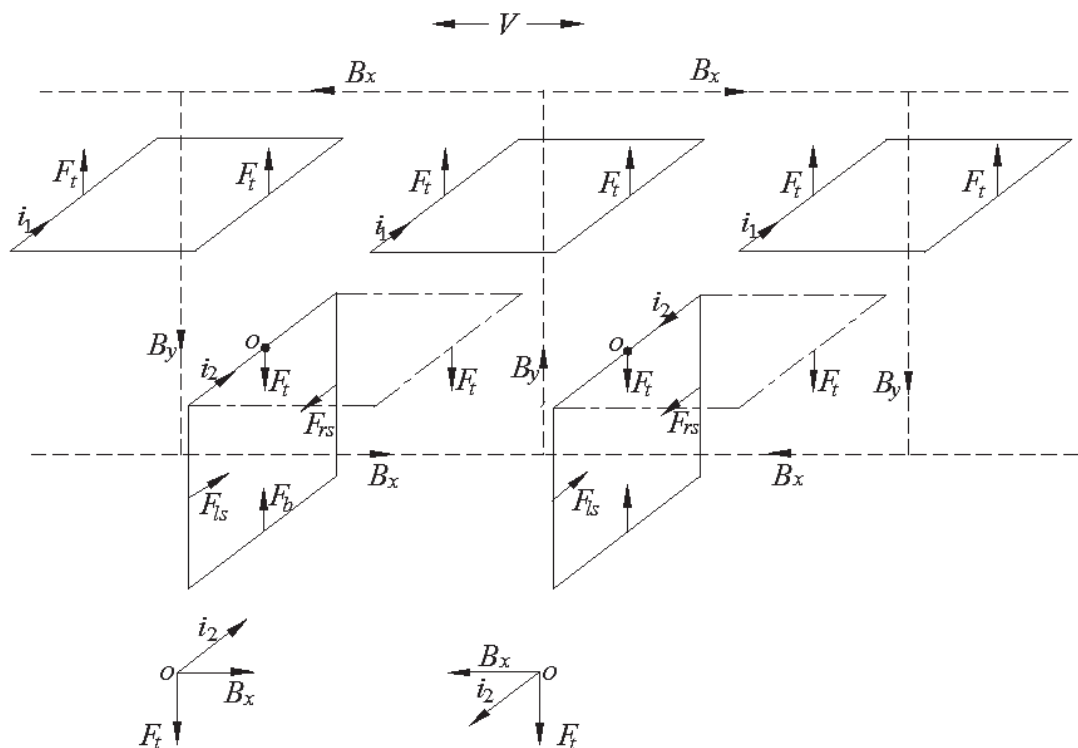


Рис. 1. Схема магнитодинамической левитации:

$\leftarrow V \rightarrow$  – скорость и направление движения транспортного средства;  $i_1$  – ток в бортовой обмотке полюса системы левитации;  $i_2$  – наведенный ток в путевой кольцевой обмотке Грамма [1];  $B_x$  – составляющая магнитной индукции в горизонтальной плоскости по направлению движения транспортного средства;  $B_y$  – составляющая магнитной индукции в вертикальной плоскости, перпендикулярной направлению движения транспортного средства;  $F_t$  – сила электромагнитного взаимодействия между бортовой обмоткой полюса системы левитации и путевой кольцевой обмоткой Грамма

та левитации и электродинамического торможения магнитолевитационных транспортных средств. На основании сравнительного анализа электромагнитных процессов можно предложить варианты конструктивного исполнения путевых дискретных треков левитации и боковой стабилизации, обеспечивающих эффективную левитацию при минимуме использования активных материалов.

## 1 Подъемная сила левитации

Путевые трековые обмотки левитации делятся на концентрированные и распределенные. Под обмоткой в данном контексте понимается система проводников или витков,

определенным образом уложенных и соединенных между собой в катушки или замкнутых на себя. К концентрированной обмотке можно отнести кольцевую обмотку Грамма, которая укладывается на активной путевой структуре в плоскости, перпендикулярной направлению движения транспортного средства (рис. 1, 2а). Примером распределенной обмотки является продольная развернутая белочья клетка (рис. 2б), которая укладывается в пазах зубчатой арматуры. Зубчатая арматура может выполняться в виде шихтованного сердечника из кремнистой электротехнической стали либо из стеклопластиковых материалов. Стеклопластиковую зубчатую арматуру целесообразно применять в случае использования бортовых сверхпроводниковых маг-

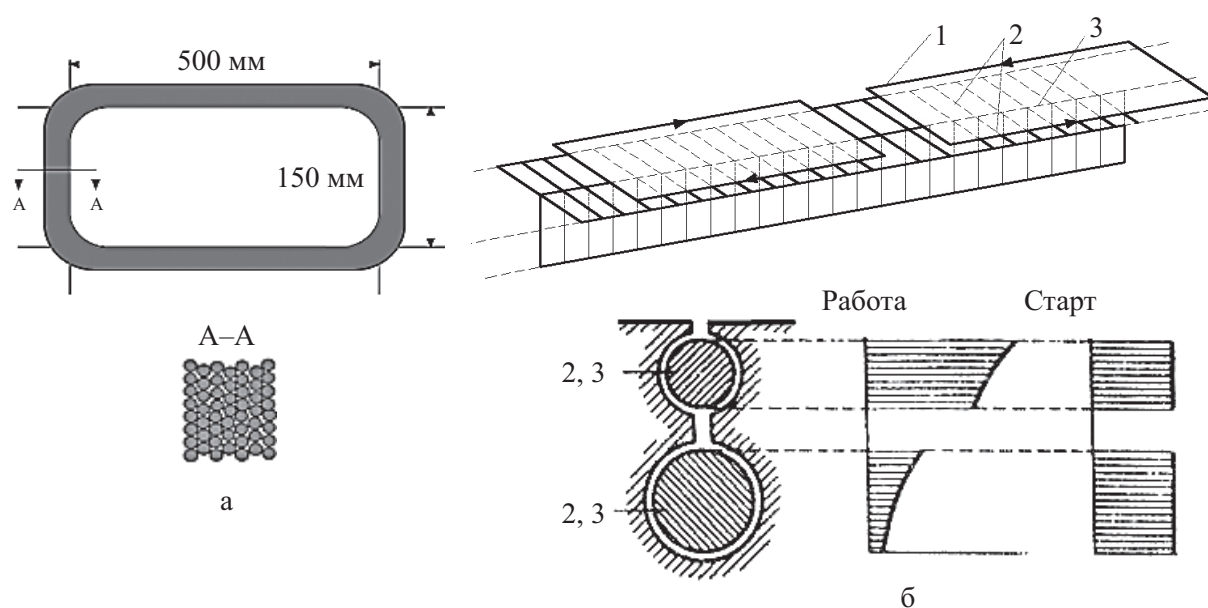


Рис. 2. Варианты исполнения путевых треків левитации:  
 а) поперечная короткозамкнутая кольцевая обмотка Грамма [2];  
 б) Т-образная двойная беличья клетка левитации 2 и боковой стабилизации 3; 1 – бортовые магнитные полюса левитации и боковой стабилизации

нитных систем левитации, создающих поля большой интенсивности.

Для определения подъемной силы левитации обратимся к рис. 2. Транспортное средство движется в плоскости рисунка слева направо или наоборот ( $\leftarrow V \rightarrow$ ). Нетрудно убедиться в том, что направление движения не влияет на возникновение подъемной силы.

Изменяющийся во времени магнитный поток, созданный током  $i_1$  в бортовой сверхпроводниковой обмотке полюса, работающей в режиме «незатухающего тока», проходя через плоскость, образованную элементарным витком, наводит в нем ток  $i_2$ , который создает магнитный поток, противодействующий изменению потокосцепления с элементарным витком. В результате возникают силы  $F_r$ ,  $F_b$ ,  $F_{ls}$  и  $F_{rs}$ , действующие на каждую из сторон элементарного витка и стремящиеся сдвинуть их к центру. Эти силы воспринимает и компенсирует арматура. Одновременно с этим вертикально направленные силы  $F_t$  действуют на бортовые обмотки полюсов, причем независимо от их полярности.

Итак, взаимодействие магнитных полей, созданных токами  $i_1$  и  $i_2$ , приводит к возникновению силы отталкивания  $F_t$  между бортовой обмоткой полюса и элементарным витком обмотки Грамма. Для первой из них, имеющей три степени свободы, сила отталкивания становится подъемной.

В бортовых магнитных полюсах системы левитации (рис. 2а) вместо сверхпроводниковых обмоток можно применить постоянные магниты в сборке «array Halbach» (рис. 3). В схемах на рис. 3 стрелка указывает направление вектора намагниченности элементарного магнита.

Характерной особенностью кольцевой обмотки Грамма (рис. 2а) является то, что удаленные от магнитного полюса стороны витка не являются активными в том смысле, что они неэффективно обеспечивают потокосцепление витка с внешним магнитным полем. Другими словами, объемная плотность энергии магнитного поля, которая в любой области пространства (в отсутствие ферромагнетиков) равна

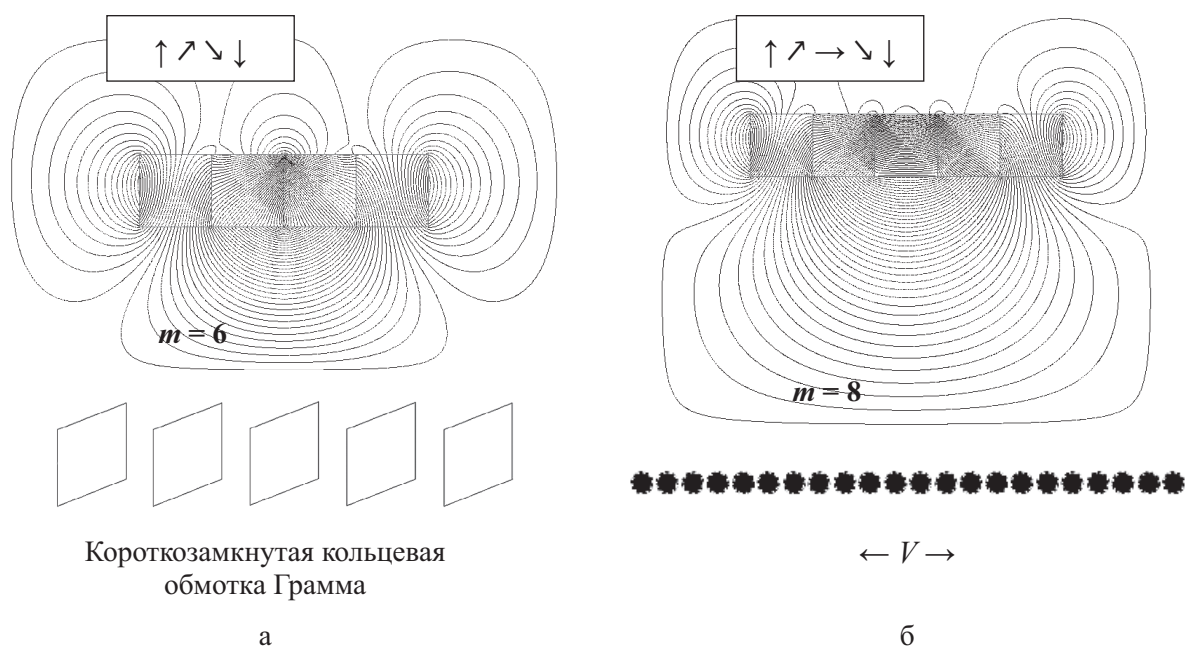


Рис. 3. Линии равного магнитного потенциала полюса левитации (а) и боковой стабилизации (б). Расчеты выполнены для коэрцитивной силы  $H_c = 8$  кА/м;  $m = 6; 8$  – период сборок «array Halbach» ( $\uparrow \nearrow \searrow \downarrow$ ), ( $\uparrow \nearrow \rightarrow \searrow \downarrow$ ) [2];  $\bullet\bullet\bullet\bullet$  – верхние стороны короткозамкнутых витков кольцевой обмотки Грамма;  $\leftarrow V \rightarrow$  – скорость и направление движения транспортного средства

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ [Дж/м}^3\text{]}, \quad (1)$$

с уменьшением плотности магнитного потока – индукции  $B$  – снижается, уменьшается магнитное давление, ответственное за создание магнитной левитации. Так, магнитное поле с индукцией  $B_1 = 1$  Тл создает магнитное давление  $\frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{1 \cdot 1}{2 \cdot 4\pi 10^{-7}} = 3,98 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> ( $\sim 40$  т/м<sup>2</sup>). То есть для обеспечения левитации транспортного средства массой 40 т номинально требуется установка на его борту магнитной системы площадью 1 м<sup>2</sup>. Уменьшение значения магнитной индукции вдвое приводит к четырехкратному снижению магнитного давления и, соответственно, силы левитации. Магнитные поля высокой интенсивности можно получить, изготавливая бортовые левитационные полюса из сверхпроводника. Таким образом, задача повышения левитацион-

ного зазора имеет комплексное решение через оптимизацию бортовых магнитных полюсов и путевых треков левитации.

Для анализа и поиска рациональных схем системы левитации рассмотрим случай бортового магнитного полюса, образованного круговым витком радиуса  $R$ , по которому течет незатухающий ток  $I$ . Магнитная индукция  $B$  в произвольной точке, расположенной на оси кругового витка на расстоянии  $h$  от его геометрического центра, равна

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{IR^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

Если  $h \ll R$ , то  $B \approx \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{R}$ , т. е. магнитная индукция с приближением к круговому витку

по оси стремится к своему значению в геометрическом центре кругового витка  $B_0$ .

$$\text{Если } h \gg R, \text{ то } B \approx \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{IR^2}{h^3} \text{ или } B \sim \frac{1}{h^3},$$

т. е. магнитная индукция с удалением от кругового витка по оси убывает пропорционально третьей степени расстояния от геометрического центра. Поскольку магнитная индукция в нижней части витка значительно ниже, чем в его верхней части, большая часть магнитного потока, создаваемого бортовым магнитным полюсом, проходит через верхнюю часть площади поверхности апертуры путевой тректовой обмотки. Полное использование магнитного потока требует увеличения размера витка кольцевой обмотки и, соответственно, расхода активных материалов на ее изготовление. Высоту путевой тректовой обмотки можно уменьшить, что повлечет за собой увеличение магнитных потоков рассеяния, не участвующих в создании левитации.

Как и в традиционных электрических машинах, в транспортной системе на основе магнитной левитации кольцевую обмотку Грамма можно заменить более эффективной обмоткой барабанного типа, примером которой является развернутая беличья клетка (рис. 2б). Нижняя сторона витка беличьей клетки должна быть уложена в путевой арматуре на расстоянии от верхней стороны, почти равном полюсному делению магнитной системы левитации, чтобы находиться под полюсом полярности, противоположной полярности верхней стороны витка. Такое расположение витка показано на рис. 1 штрихпунктирным контуром. При одинаковом магнитном потоке и скорости движения транспортного средства в витке барабанной обмотки наводится вдвое большая электродвижущая сила (ЭДС), чем в витке кольцевой обмотки. Однако для размещения развернутой беличьей клетки барабанного типа имеется более ограниченное пространство, чем для кольцевой обмотки Грамма (рис. 3б). Напрашивающийся в связи с этим переход от дискретной беличьей клетки к сплошной реактивной шине не оправдан

из-за повышенных потерь на вихревые токи в шине.

Как указано выше, конструкция путевого трека левитации в виде поперечной кольцевой обмотки Грамма металлоемка. Однако с учетом высокой левитационной эффективности такие треки могут устанавливаться, например, на остановочных пунктах – там, где требуется переход в левитационный режим на малой скорости во время разгона транспортного средства и его замедления по прибытии на станцию. Этим достигается малая начальная скорость возникновения левитации, а вместе с ней – и повышенный левитационный зазор. Протяженные скоростные участки трассы могут снабжаться менее металлоемкими путевыми треками из развернутых беличьих клеток, образующих Т-образную конфигурацию (см. рис. 2б сверху). Кольцевая обмотка Грамма имеет катушечное исполнение (см. рис. 2а). Развернутые беличьи клетки изготавливаются из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко боковыми шинами. Стержни размещаются в пазах несущей немагнитной конструкции путепровода.

Т-образный путевой трек по эффективности может конкурировать с поперечной короткозамкнутой кольцевой обмоткой Грамма, если выполнен глубокими пазами или с двойной беличьей клеткой (рис. 2б внизу). Как и у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, отношение высоты к ширине глубокого паза составляет 9:10.

В отличие от пуска и выхода на номинальный режим работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, левитационный процесс развивается в обратной последовательности. В начале движения транспортного средства частота изменения магнитного поля, создаваемого бортовыми магнитными полюсами левитации 1 (см. рис. 2б), в беличьей клетке левитации 2 относительно мала. Плотность тока, наведенного в верхней и нижней беличьих клетках, практически одинаковая (см. «Старт» на рис. 2б). По мере набора скорости транспортным средством частота изменения магнитного поля в обла-

сти расположения двойной беличьей клетки возрастает. Индуктивное сопротивление нижней беличьей клетки становится больше, чем верхней, поскольку она сцеплена с большей частью магнитного потока. Наведенный ток вытесняется в верхнюю беличью клетку. Это равноценно увеличению суммарного активного сопротивления двойной беличьей клетки, что в конечном итоге сказывается на росте электродинамического сопротивления движению транспортного средства. Номинальному режиму работы системы левитации соответствует диаграмма на рис. 2б (см. «Работа»).

Из технологических соображений вместо двойной беличьей клетки можно применять глубокопазную. Наиболее эффективна бутылочная форма стержня глубокопазной беличьей обмотки: она позволяет уменьшить расход активного материала.

На рис. 3б жирными черными точками условно показаны сечения верхних сторон витков поперечной кольцевой обмотки Грамма. Элементарные короткозамкнутые витки могут изготавливаться массивными, подобно стержневой беличьей клетке, либо в виде катушечных групп с поперечным сечением, показанным внизу на рис. 2а.

## 2 Электродинамическое торможение

Рассмотрим процесс возникновения электродинамического торможения на примере конструкции устройства левитации с путевой трековой обмоткой в виде развернутой беличьей клетки. Во время движения транспортного средства магнитное поле бортовых полюсов перемещается вдоль беличьей клетки. Поскольку она всегда остается неподвижной, относительная частота  $f_1$  бегущего магнитного поля зависит от линейной скорости  $V$  транспортного средства и полюсного деления  $\tau$ . Магнитное поле индуцирует в беличьей клетке ЭДС  $E_2$ , имеющую частоту  $f_2 = f_1 \equiv f$  и направление, определяемое по правилу «ладони левой руки». В короткозамкнутых витках беличьей клетки, находящихся в

бегущем магнитном поле, наводится ток  $I_2$ , направление которого совпадает с ЭДС  $E_2$ . Взаимодействие магнитного потока, созданного индуцированным током, с магнитным потоком бортовых полюсов образует суммарный магнитный поток, градиент индукции которого направлен противоположно линейной скорости  $V$  транспортного средства (см. рис. 2). Возникающая в результате этого сила, действующая на полюс, направлена против направления движения транспортного средства, т.е. является тормозящей. Совокупность сил электродинамического торможения, созданных отдельными проводниками, образует суммарный электромагнитный момент, для преодоления которого требуется затрачивать часть мощности тягового линейного электродвигателя.

Предположим, что результирующий магнитный поток в левитационном зазоре постоянен,  $\Sigma\Phi = \text{const}$ . Если собственная индуктивность беличьей клетки  $-L_2$ , то ее индуктивное сопротивление  $x_2 = 2\pi f L_2$ .

В отличие от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором устройство левитации всегда работает при скольжении  $s = 1$ , поэтому при всех скоростных режимах транспортного средства

$$E_{2s} = E_2 \frac{f_2}{f_1} = E_2 s = E_2; \quad (3)$$

$$x_{2s} = x_2 \frac{f_2}{f_1} = x_2 s = x_2. \quad (4)$$

Отсюда находим наведенный в беличьей клетке ток:

$$I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} \quad (5)$$

и

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где  $r_2$  – активное сопротивление беличьей клетки;  $\psi_2$  – угол сдвига между ЭДС  $E_2$  и током  $I_2$ .

Тормозной электромагнитный момент  $M$ , возникающий в результате взаимодействия магнитного потока  $\Sigma\Phi$  и активной составляющей тока в беличьей клетке  $I_2 \cos \psi_2$ , определяется как

$$M = k \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} \cdot \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} = k \frac{E_2 s r_2}{r_2^2 + (x_2 s)^2}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Поскольку  $s = 1 > 0$ , из (7) следует, что момент  $M$  является положительным, т.е. стремится сдвинуть стационарно закрепленный путевой трек левитации в направлении движения транспортного средства. В конечном итоге это отражается на создании тормозной силы по отношению к транспортному средству.

Для дальнейшего анализа воспользуемся уравнением для нахождения максимального значения момента  $M_{\max}$ :

$$\frac{dM}{ds} = kE_2 \frac{r_2 [r_2^2 + (x_2 s)^2] - sr_2 2sx_2^2}{[r_2^2 + (x_2 s)^2]^2} = 0. \quad (8)$$

Откуда следует, что

$$s_{\max} = \pm \frac{r_2}{x_2}. \quad (9)$$

Комбинируя (8) и (9), имеем

$$M_{\max} = \pm k \frac{E_2}{2x_2}. \quad (10)$$

Следовательно, максимальное значение момента  $M_{\max}$  не зависит от активного сопротивления  $r_2$  путевой трековой обмотки (беличьей клетки). Он прямо пропорционален наводимой ЭДС  $E_2$  и обратно пропорционален индуктивному сопротивлению  $x_2$ .

Подставив в (10) соответствующие выражения величин, получим

$$M_{\max} = \pm k \frac{f_2 \Sigma\Phi}{2 \cdot 2\pi f_2 L_2} = \pm k \frac{\Sigma\Phi}{4\pi L_2} = \pm \frac{k}{4\pi} \cdot \frac{\Sigma\Phi}{L_2}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что максимальное значение момента  $M_{\max}$  не зависит от линейной скорости  $V$  транспортного средства (от частоты  $f$ ) и определяется результирующим магнитным потоком  $\Sigma\Phi$  в левитационном зазоре и собственной индуктивностью  $L_2$  путевой трековой обмотки. Чем больше магнитный поток  $\Sigma\Phi$ , тем больше тормозной момент. Наоборот, чем больше собственная индуктивность  $L_2$ , тем меньше момент. Из этого следует вывод о целесообразности использования дискретных путевых трековых обмоток с большим числом элементарных короткозамкнутых витков (контуров). Применение шихтованного сердечника в данном случае проблематично. Однако если это имеет место, то для уменьшения высших гармонических ЭДС, вызванных пульсациями магнитного потока из-за наличия зубцов, магнитное сопротивление которых существенно ниже магнитного сопротивления путевой трековой обмотки, а также для снижения шума, вызываемого магнитными причинами, пазы сердечника, в которых располагаются стержни (витки) обмотки, делают скошенными.

Поскольку  $s = 1$ , то  $r_2 = x_2$  и выражение (5) приобретает вид

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_2}{r_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_2}{x_2} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{\Sigma\Phi}{L_2}. \quad (5a)$$

Сопоставляя (11) и (5a), видим, что правые части уравнений различаются практически только коэффициентом пропорциональности  $k$ , размерность которого  $[(\text{м}^2 \cdot \text{кг})/(\text{А} \cdot \text{с}^2)]$ .

Из (7) следует выражение

$$M = k \frac{E_2}{2r_2} = k \frac{E_2}{2x_2}, \quad (7a)$$

которое при предельном переходе  $r_2 \rightarrow 0$  (путевая трековая обмотка выполнена из сверхпроводника) имеет неопределенность, поскольку  $E_2 = 0$ . Вместе с тем, из-за отсутствия потокосцепления со сверхпроводниковой путевой трековой обмоткой физически детерминированным является нулевое значение тормозного момента,  $M = 0$ .

Дополнительная мощность тягового линейного электродвигателя  $P_D$ , необходимая для преодоления тормозного момента, зависит от частоты наводимой в беличьей клетке ЭДС, которая равна частоте  $f_1$  бегущего магнитного поля, зависящей от линейной скорости  $V$  транспортного средства и полюсного деления  $\tau$ :

$$\begin{aligned} P_D &= 2\pi f_1 M = k 2\pi f_2 \frac{E_2}{2x_2} = \\ &= k 2\pi f \frac{E_2}{2 \cdot 2\pi f L_2} = \\ &= k \frac{E_2}{2L_2} = k \frac{f\Phi}{2L_2} = \frac{k V \Phi}{2 \tau L_2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Выражение (12) отличается от аналогичных соотношений, полученных, например, исходя из начального рассмотрения потерь на вихревые токи в реактивной шине [3]. Поскольку величины  $L_2$  и  $\tau$  постоянны, дополнительная мощность  $P_D$  находится в прямо пропорциональной зависимости от скорости  $V$  транспортного средства и результирующего магнитного потока  $\Sigma\Phi$  в левитационном зазоре. Ранее принятое предположение  $\Sigma\Phi = \text{const}$  не совсем корректно. С ростом скорости  $V$  увеличивается продольная размагничивающая «реакция якоря», вследствие чего  $\Sigma\Phi \rightarrow 0$  и  $P_D \rightarrow 0$ .

Аналогичный результат, однако при любой скорости  $V$  транспортного средства, по-

лучим в случае исполнения беличьей клетки из сверхпроводника – благодаря свойству сверхпроводящих контуров сохранять потокосцепление неизменным, в том числе нулевым.

Дополнительная тяговая сила, необходимая для компенсации силы торможения, определяется как

$$F_D = \frac{P_D}{V}. \quad (13)$$

Анализ ее зависимости от параметров системы левитации и режима движения транспортного средства аналогичен представленному выше.

### 3 Пути снижения начальной скорости появления левитации и повышения зазора

Начальную скорость появления левитации можно снизить за счет малого полюсного деления бортовых магнитных полюсов. Одним из возможных путей оптимизации бортовых магнитных полюсов левитации для достижения малого полюсного деления  $\tau$  при умеренной магнитной индукции в рабочем зазоре является использование постоянных магнитов с высокой коэрцитивной силой, устанавливаемых по одной из схем «array Halbach» [2]. Периодическую структуру «array Halbach» из однородно намагниченных постоянных магнитов можно реализовать четырьмя способами (рис. 4): ( $\uparrow \rightarrow \downarrow$ ), ( $\uparrow \nearrow \searrow \downarrow$ ), ( $\uparrow \nearrow \rightarrow \searrow \downarrow$ ) и ( $\uparrow \searrow \downarrow$ ). В этих схемах векторы намагниченности (стрелки) последовательно повернуты на соответствующий угол. 1-я:  $\pi/2 - \pi/2$ , 2-я:  $\pi/4 - \pi/2 - \pi/4$ , 3-я:  $\pi/4 - \pi/4 - \pi/4 - \pi/4$ , 4-я:  $\pi/4 - \pi/4$ . Обозначив период сборки  $m$ , имеем для 1-й и 4-йборок  $m_1 = 4$ , для 2-й –  $m_2 = 6$ , для 3-й –  $m_3 = 8$ . По аналогии с обмотками электрических машин полюсное деление сборки  $\tau = m \cdot l$ , где  $l$  – длина элементарного магнита (в направлении движения транспортного средства).



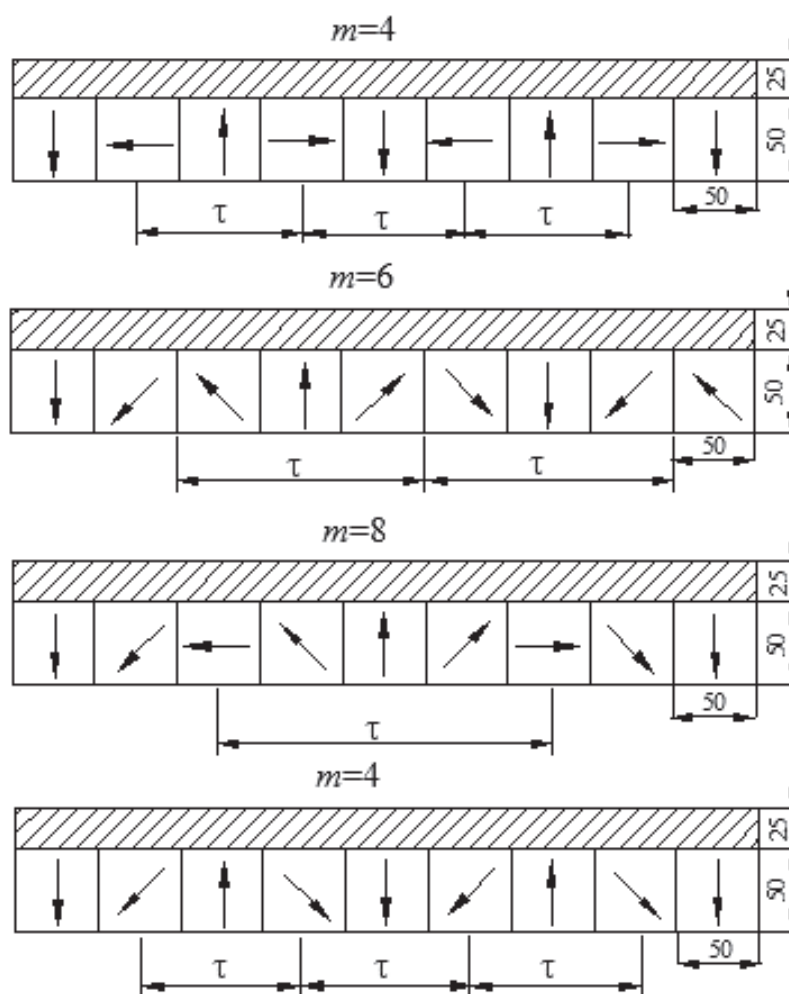


Рис. 4. Основные схемы сборки «аггау Halbach» постоянных магнитов

Если транспортное средство движется со скоростью  $V$ , то магнитное поле, создаваемое бортовым магнитным полюсом левитации, наводит в путевой беличье клетке (реактивной шине) ЭДС с частотой  $f_2 = V/\tau$ . Например, для случая простейшей сборки «аггау Halbach» ( $\uparrow \rightarrow \downarrow$ ) из однотипных элементарных магнитов с габаритами  $50 \times 50 \times 50$  мм и при скорости  $V = 10$  м/с (36 км/ч) частота наводимой ЭДС  $f_2 = 10/(4 \cdot 50 \cdot 10^{-3}) = 50$  Гц. В начальный период набора скорости транспортным средством, например, при  $V = 1$  м/с (3,6 км/ч), частота наводимой ЭДС на порядок ниже и равна 5 Гц.

Приведенные оценки указывают, что на начальном участке набора скорости транспортным средством наведенный ток распре-

деляется практически равномерно по всему сечению проводника, и таким образом вся обмотка Грамма или беличья клетка эффективно участвуют в создании подъемной силы. В результате левитация возникает практически сразу же после начала движения транспортного средства.

Это подтверждают результаты расчетов и экспериментов на адекватной модели (рис. 5), выполненных независимо в Лоуренсовской ливерморской национальной лаборатории (LLNL, США) [4] и в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА, Россия) [5].

В опытных поездках MLU-001 и MLU-002 (Япония) сверхпроводниковые магнитные

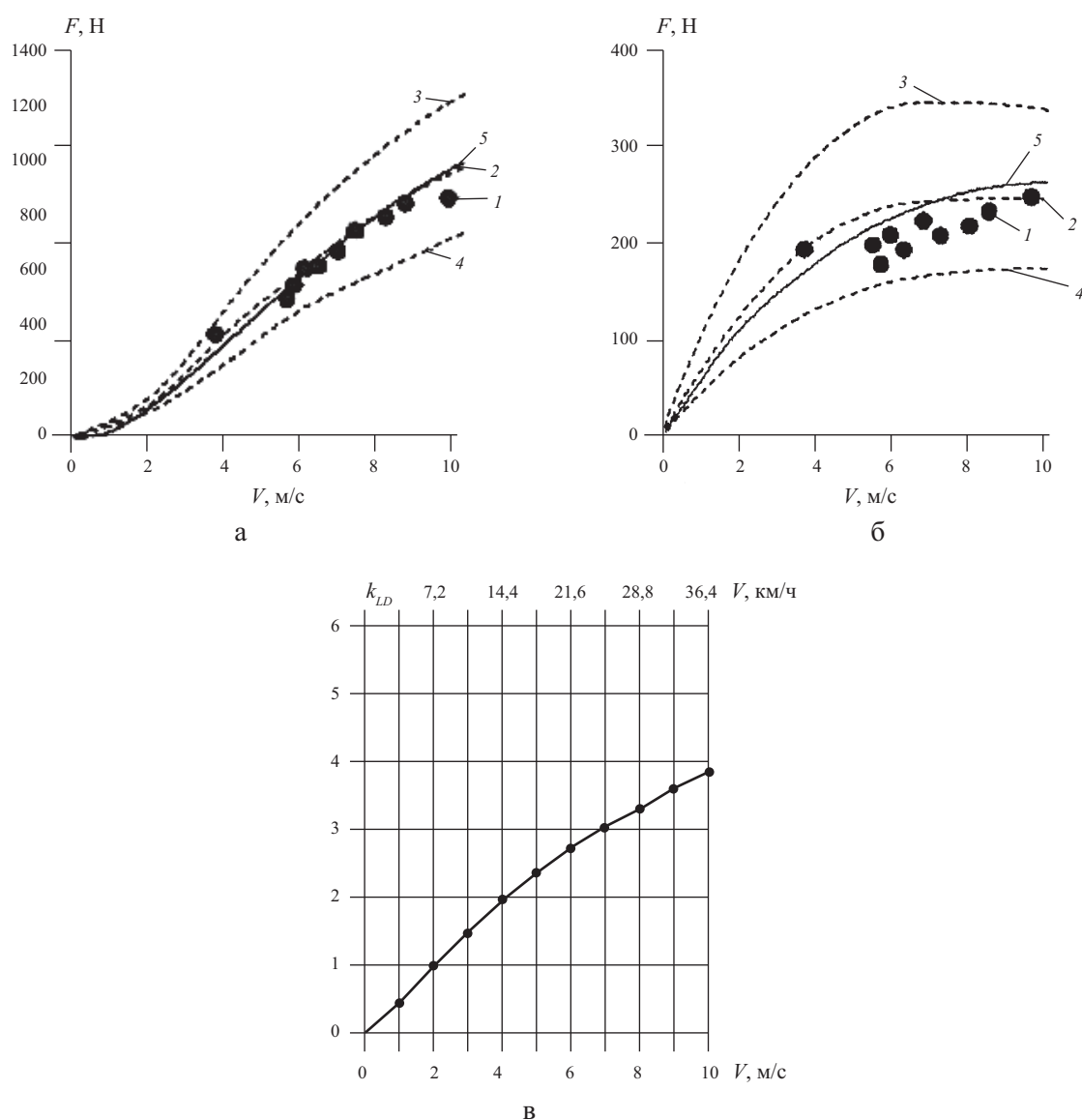


Рис. 5. Зависимость силы левитации  $F_L$  (а), электродинамического торможения  $F_D$  (б) и коэффициента эффективности левитации  $k_{LD} = F_L/F_D$  (в) от скорости движения  $V$  транспортного средства: 1 – эксперимент LLNL [4]; 2 – расчет LLNL; 3, 4 – расчет LLNL при отклонении пути вверх/вниз на  $\pm 1$  мм; 5 – расчет НИИЭФА по модели TORNADO [5]

полюса левитации имеют полюсное деление  $\tau = 2,1$  м. Левитация в этих поездах наступает в диапазоне скоростей  $V = 80\text{--}100$  км/ч ( $22,2\text{--}27,8$  м/с). Соответствующая частота наводимой ЭДС находится в пределах  $f_2 \approx 11\text{--}13$  Гц. Магнитная индукция, создаваемая сверхпроводниковым магнитным полюсом,  $B = 4,7$  Тл, что в 4 раза выше остаточной магнитной индукции  $B_r$  постоянного магнита

NdFeB. Таким образом, в отношении создания левитации повышенное значение полюсного деления (примерно в 4 раза) «компенсируется» 4-кратным повышением значения магнитной индукции.

Представленные на рис. 5 результаты расчетов и эксперимента получены для левитационной системы с двумя магнитными полюсами [3, 4]. Параметры «array Halbach»:

элементарный однородно намагниченный магнит NdFeB имеет остаточную магнитную индукцию  $B_r = 1,2$  Тл, длина  $\times$  ширина  $\times$  высота верхнего полюса –  $425 \times 125 \times 25$  мм, нижнего –  $425 \times 75 \times 25$  мм,  $m_1 = 4$ . Воздушный зазор между магнитными полюсами 35 мм. Полюсное деление  $\tau_1 = m_1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 0,1$  м. Путь трек левитации на экспериментальном стенде представляет собой пакет (ламинат) из 10 изолированных медных листов толщиной 0,5 мм, шириной 200 мм. Медные листы имеют поперечную (относительно направления движения транспортного средства) перфорацию шириной 0,5 мм, длиной 150 мм с шагом 3 мм.

Как следует из рис. 5в, для рассматриваемых схем коэффициент эффективности левитации  $k_{LD} = F_L/F_D$  на участке разгона транспортного средства достаточно высок. По этому показателю все схемы сборки «array Halbach» примерно равны (см. рис. 4). Выбор в пользу той или иной схемы системы левитации и боковой стабилизации обусловлен противоречивыми требованиями – потребностью увеличения подъемной силы и сокращения расхода элементарных магнитов, идущих на изготовление соответствующих магнитных полюсов.

## Заключение

Выполненные исследования показывают возможность применения теории и инженерных методов расчета, разработанных для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором для анализа систем левитации. Приве-

денные соотношения и сделанные на их основании числовые оценки параметров систем левитации показывают эффективность магнитных полюсов, собранных по схеме «array Halbach». Наименьшую начальную скорость возникновения левитации обеспечивает простейшая схема сборки «array Halbach» постоянных магнитов с малым полюсным делением. Такие сборки постоянных магнитов по эффективности конкурентоспособны с магнитными полюсами, выполненными из сверхпроводников.

## Библиографический список

1. **Электрические** машины / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Ч. II. – Москва : Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. – 651 с.
2. **Gurol S.**, Baldi B., Post R. F. General Atomics Low Speed Maglev Technology Development Program. – URL : <http://www.monorails.org/pdfs/General%20Atomsics%202003.pdf>.
3. **Сверхпроводящие** машины и устройства / пер. с англ. ; под ред. С. Фонера, Б. Шварца. – Москва : Мир, 1977. – 763 с.
4. **Hoburg J. F.**, Post R. F. A Laminated Track for the Inductrack System : Theory and Experiment // Lawrence Livermore National Laboratory. – URL: <http://www.askmar.com/Inductrack/2004-10%20Inductrack%20Laminated%20Track.pdf>.
5. **Вычислительные** модели для анализа и оптимизации электродинамического подвеса магнитолевитационных транспортных систем / В. М. Амосков, Ю. Ф. Антонов, Д. Н. Арсланова и др. // Транспортные системы и технологии. – 2013. – Вып. 3. – URL : <http://www.transssyst.ru/vypusk-3-2013.html>.