

Магнитное поле и силы в гибридной системе левитации высокоскоростного транспорта

КИМ К.И., КИМ К.К., ВЕШКИН В.В.

ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается гибридная система, предназначенная для обеспечения левитации экипажа высокоскоростного наземного транспорта при низких скоростях движения. Левитация обеспечивается за счет одновременного использования электродинамических сил отталкивания и электромагнитных сил притяжения. Конструктивно это реализуется с помощью двух продольных путевых полотен, одно из которых – электропроводящее и немагнитное – расположено снизу от экипажного соленоида возбуждения, а второе – ферромагнитное – расположено сверху от него только на участках разгона, торможения и посадки. Чтобы обеспечить равенство совокупной силы левитации и веса экипажа на всех перечисленных участках движения, ферромагнитное полотно выполнено так, что его площадь, участвующая в образовании силы притяжения, изменяется в зависимости от скорости движения экипажа. Во избежание негативного воздействия вихревых токов, индуцированных в ферромагнитном полотне, оно изготавливается из пластин, электроизолированных друг от друга. При расчетах путевые полотна представлялись плитами бесконечного размера. Получено аналитическое решение для магнитного поля и левитационных сил. Показано, что в частных случаях из указанных решений следуют результаты, совпадающие с результатами, полученными ранее другими авторами для традиционной левитационной системы отталкивания. Подтверждена возможность левитации при низких скоростях и остановках, при этом некоторое увеличение тормозной силы не оказывает существенного влияния на мощность тягового линейного двигателя.

К л ю ч е в ы е с л о в а: левитация, электродинамическая сила, электромагнитная сила, сверхпроводящий соленоид возбуждения, экипаж, магнитное поле

Одним из основных вариантов реализации магнитной левитации в высокоскоростном наземном транспорте является принцип электродинамического подвеса (ЭДП), при котором левитационная сила отталкивающего характера образуется в результате взаимодействия постоянного магнитного поля сверхпроводящих соленоидов, расположенных на экипаже, с вихревыми токами, индуцированными в токопроводящих структурах, жестко закрепленных вдоль путевого полотна [1–6].

Вместе с положительными качествами система ЭДП обладает одним существенным недостатком: левитационная сила зависит от скорости движения экипажа и достигает требуемого значения на скорости выше 80–100 км/ч. Поэтому возникает необходимость в дополнительной подвеске. Например, в японских системах типа Maglev [7–16] она осуществляется с использованием колесных шасси. И хотя это решение не лишено практического смысла, вопрос о бесконтактном подвесе при низких скоростях движения экипажа является актуальным.

Решением указанной проблемы является модернизация традиционной системы ЭДП за счет дополнительного использования ферромагнитного полотна, закрепленного на верхнем строении пути и расположенного над сверхпроводящими экипажными соленоидами. Такая гибридная система конструируется таким

образом, чтобы суммарная левитационная сила, состоящая из силы ЭДП и силы притяжения к ферромагнитному полотну, равнялась весу экипажа. Если иметь в виду, что необходимость в ферромагнитном полотне существует только на разгонном, тормозном и посадочном участках, длина которых составит в совокупности не более 1 км, то экономическая целесообразность такого решения сомнения не вызывает.

Конструкция ферромагнитного полотна. Для поддержания постоянным значения левитационной силы на указанных участках движения ферромагнитное полотно выполняется с формой (вид сверху), показанной на рис. 1. Позициями 1, 2, 3 обозначены участки разгона, торможения и стоянки экипажа 4. Можно видеть, что при стоянке экипажа (участок 3), когда электродинамическая сила отталкивания равна нулю из-за неподвижности экипажных сверхпроводящих соленоидов относительно путевого полотна, сила подвеса создается только за счет притяжения к ферромагнитному полотну, причем в этом случае сила притяжения принимает наибольшее значение, так как площадь ферромагнитного полотна, взаимодействующая с магнитным полем экипажных соленоидов, максимальна. При разгоне (участок 1) начинает появляться также сила электродинамического отталкивания, в то время как сила притяжения начинает снижаться благо-

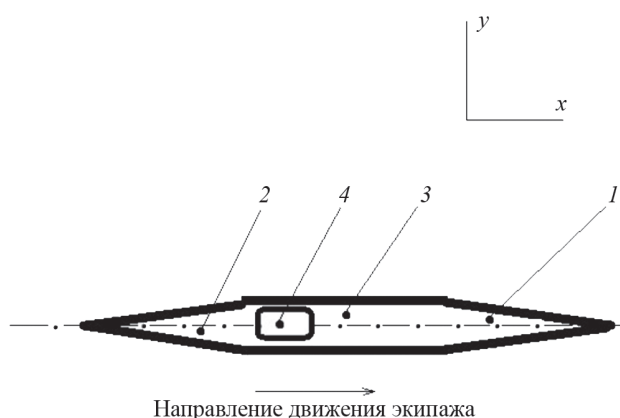


Рис.1. Форма ферромагнитного полотна
Fig.1. The shape of the ferromagnetic track

даря уменьшению площади ферромагнитного полотна. В результате результирующая левитационная сила остается практически постоянной. На участке торможения наблюдается обратная картина.

Если система ЭДП достаточно полно исследована [2], рассмотрение электромагнитных процессов в условиях гибридной левитации представляет определенный интерес.

Ниже рассматриваются магнитное поле и электромагнитные силы в гибридной системе левитации, состоящей из прямоугольной рамки с постоянным током I и двух продольных плит (полотна в виде плит бесконечных размеров). Одна плита электропроводящая и немагнитная, имитирующая путевое полотно ЭДП, а другая – ферромагнитная.

Уравнения поля и выражения для электромагнитных сил. На рис. 2 представлена схема рассматри-

ваемой системы левитации. В плоскости $xу$ расположена прямоугольная рамка с током I , центр её совпадает с началом координат. Рамка и система координат движутся вдоль оси x со скоростью v . Области 2 и 5 – плиты, параллельные плоскости $xу$. Области 1, 3, 4 и 6 – воздух.

Электромагнитные процессы в плите описываются уравнением диффузии магнитного поля

$$\Delta B = \mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t}, \tag{1}$$

где μ и σ – магнитная проницаемость и проводимость плиты; Δ – лапласиан. Магнитное поле вне плиты удовлетворяет уравнению Лапласа.

Учитывая условия работы данной транспортной системы, трудно предположить допустимость режимов, при которых $\partial v/\partial t$ достигает значительной величины. Следовательно, можно предполагать, что при ожидаемых переходах сколько-нибудь заметные экстратоки в полотне не появятся и считать, что изменение вихревого поля при изменении скорости рамки происходит без запаздывания. Тогда, полагая

$$x = \underline{x} - vt,$$

где x – абсцисса произвольной точки в неподвижной в пространстве системе координат, из (1) получим

$$\Delta B + \mu\sigma v \frac{\partial B}{\partial x} = 0. \tag{2}$$

Таким образом, осуществлен переход к рассмотрению электромагнитных процессов в полотне в координатах, жестко связанных с рамкой. Процессы в этих координатах, как следует из (2), имеют стационарный характер, что является следствием указанного допу-

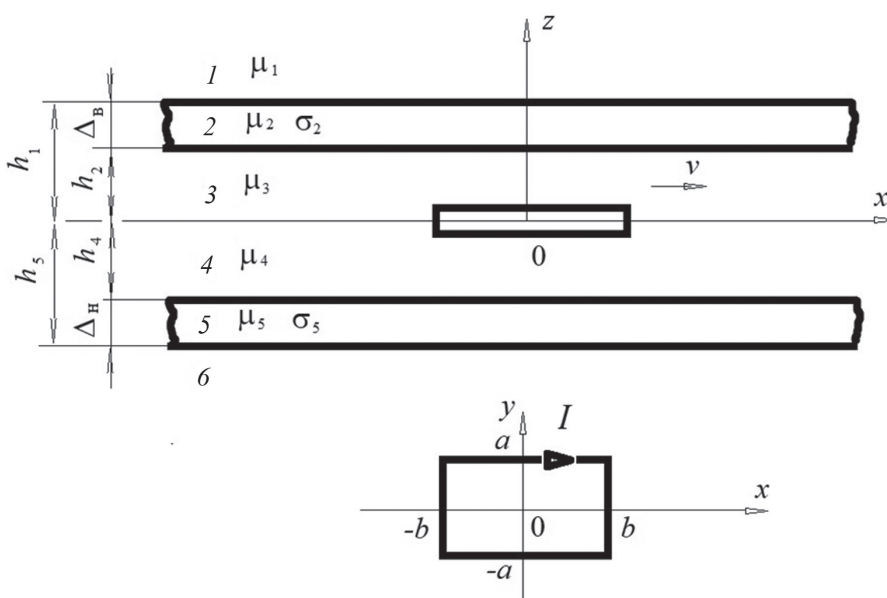


Рис.2. Расчетная схема
Fig. 2. Design scheme

щения относительно характера возможных переходов. В рамках этого ограничения уравнение (2) и уравнение Лапласа полностью описывают магнитное поле и электромагнитные силы в рассматриваемой гибридной системе левитации (рис. 2).

К (2) применим интегральное преобразование по x и y . Так как размеры полотна в этих направлениях бесконечны, будем иметь Фурье-преобразование с ядром $e^{-ik_x x}$ и $e^{-ik_y y}$ (k_x и k_y – волновые числа по осям x и y). Здесь детали, связанные с симметрией распределения отдельных компонент магнитного поля, не уточняются. Имеем

$$\frac{d^2 B(k)}{dx^2} - (k_x^2 + k_y^2 - i\mu\sigma v k_x) B(k) = 0, \quad (3)$$

где $B(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(r) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy$, $B(r)$ – индукция в пространстве x, y, z .

Из (3) следует:

$$B(k) = c e^{-ik_z z} + d e^{-ik_z z}; \quad (4)$$

$$k_z = (i\mu\sigma v k_x - k_x^2 - k_y^2)^{0,5}, \quad (5)$$

где $c = e_x c_x + e_y c_y + e_z c_z$; $d = d_x d_x + e_y d_y + e_z d_z$; e_x, e_y, e_z – орты.

Выполним преобразование Фурье тока рамки:

$$J(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(r) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy,$$

где $J(r)$ – ток рамки в пространстве x, y, z .

Учитывая конфигурацию токовой рамки (рис. 2), можем записать:

$$J(k) = e_x I \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-b}^b [\delta(y-a) - \delta(y+a)] e^{-i(k_x x + k_y y)} dx - e_y I \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-a}^a [\delta(y-b) - \delta(y+b)] e^{-i(k_x x + k_y y)} dy.$$

Здесь I – ток в рамке; $\delta(x \pm b)$ и $\delta(y \pm a)$ – дельта-функции.

Следовательно, имеем:

$$J(k) = -i4I \sin(k_x b) \sin(k_y a) \left(\frac{e_x}{k_x} - \frac{e_y}{k_y} \right). \quad (6)$$

Соотношение (4) для магнитной индукции в пространстве k при соответствующем уточнении справедливо для любой области рассматриваемой системы. Как видно из (5), величина k_z зависит от μ и σ среды. Поэтому его следует переписать:

$$k_{zn} = (i\mu_n \sigma_n v k_x - k_x^2 - k_y^2)^{0,5},$$

где n – номер области.

Так как $k_{z1} = k_{z6} = i(k_x^2 + k_y^2)^{0,5}$, то в областях 1 и 6 (рис. 2) один из членов в (4) пропадает, что связано с условием $B(k) = 0$ на бесконечности. Поэтому

$$B_n(k) = c_n e^{-ik_{zn} z} + d_n e^{-ik_{zn} z}. \quad (7)$$

Условия $\text{div} B = 0$ и $\text{rot}_z H = 0$ (последнее означает отсутствие z -компоненты тока) можно распространить и на их Фурье-образ:

$$\text{div} B_n(k) e^{i(k_x x + k_y y)} = 0; \quad \text{rot}_z H_n(k) e^{i(k_x x + k_y y)} = 0.$$

Отсюда, имея в виду

$$c = e_x c_{xn} + e_y c_{yn} + e_z c_{zn} \quad \text{и} \quad d = d_x d_{xn} + e_y d_{yn} + e_z d_{zn},$$

получим

$$c_{yn} = \frac{k_y}{k_x} c_{xn}; \quad d_{yn} = \frac{k_y}{k_x} d_{xn}; \quad (8)$$

$$c_{zn} = -\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x k_{zn}} c_{xn}; \quad d_{zn} = \frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x k_{zn}} d_{xn}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что для определения магнитной индукции (7) в пространстве k достаточно найти c_{xn} и d_{xn} . Эти величины могут быть вычислены из условий сопряжения магнитного поля на границах областей. При этом в силу (8) условия для $H_{xn}(k)$ и $H_{yn}(k)$ совпадут. Кроме того, необходимо учесть наличие тока в плоскости xu , распределенного согласно (6). Таким образом, будем иметь:

$$H_{xn} = H_{x(n+1)} \rightarrow c_{xn} e^{-ik_{zn} h_n} + d_{xn} e^{-ik_{zn} h_n} = \frac{\mu_n}{\mu_{n+1}} \left(c_{x(n+1)} e^{-ik_{z(n+1)} h_n} + d_{x(n+1)} e^{-ik_{z(n+1)} h_n} \right); \quad (10)$$

$$B_{zn} = B_{z(n+1)} \rightarrow c_{zn} e^{-ik_{zn} h_n} - d_{zn} e^{-ik_{zn} h_n} = \frac{k_{zn}}{k_{z(n+1)}} \left(c_{x(n+1)} e^{-ik_{z(n+1)} h_n} - d_{x(n+1)} e^{-ik_{z(n+1)} h_n} \right),$$

где $n = 1, 2, 4, 5$, причем согласно (7) $d_{x1} = c_{x6} = 0$, и тогда:

$$H_{x3} - H_{x4} = J_y \rightarrow c_{x3} + d_{x3} =$$

$$\frac{\mu_3}{\mu_4} (c_{x4} + d_{x4}) + \mu_0 J_y(k); \quad (11)$$

$$B_{z3} = B_{z4} \rightarrow c_{x3} - d_{x3} = \frac{k_{z3}}{k_{z4}} (c_{x4} - d_{x4}),$$

где $J_y(k)$ — y -компонента величины $J(k)$, т.е.

$$J_y(k) = -i \frac{4}{k_y} I \sin(k_x b) \sin(k_y a). \quad (12)$$

Из уравнений (10) и (11) легко вычислить все c_{xn} и d_{xn} . Однако для определения электромагнитной силы, действующей на токовую рамку, необходимо определить вихревое поле в плоскости xy . Данное поле в этой плоскости определяется величинами c_{x4} и d_{x3} и равно:

$$\begin{aligned} B_x(k) &= c_{x3} + d_{x3}; \\ B_y(k) &= \frac{k_y}{k_x} B_x(k); \\ B_z(k) &= \frac{i(k_x^2 + k_y^2)^{0,5}}{k_x} (c_{x4} - d_{x3}). \end{aligned} \quad (13)$$

Величины c_{x4} и d_{x3} представляют соответственно вклады в вихревое поле, обусловленные нижним и верхним полотнами:

$$c_{x4} = \mu_0 \frac{J_y(k)}{2} \frac{V_1(k) [V_4(k) - V_3(k)]}{V_1(k)V_2(k) + V_3(k)V_4(k)}; \quad (14)$$

$$d_{x3} = \mu_0 \frac{J_y(k)}{2} \frac{V_2(k) [V_1(k) + V_3(k)]}{V_1(k)V_2(k) + V_3(k)V_4(k)}, \quad (15)$$

где

$$V_{1,3}(k) = \begin{bmatrix} (1 \mp m_{45}m_{56}) \cos(k_{z5}\Delta_H) - \\ -i(m_{56} \mp m_{45}) \sin(k_{z5}\Delta_H) \end{bmatrix} e^{-ik_{z4}h_4}; \quad (16)$$

$$V_{2,4}(k) = \begin{bmatrix} (1 \mp m_{12}m_{23}) \cos(k_{z2}\Delta_B) - \\ -i(m_{12} \mp m_{23}) \sin(k_{z2}\Delta_B) \end{bmatrix} e^{-ik_{z3}h_2}. \quad (17)$$

В (16) и (17) верхние знаки соответствуют $V_1(k)$ и $V_2(k)$, нижние – $V_3(k)$ и $V_4(k)$; Δ_B и Δ_H – толщины верхнего и нижнего полотна.

Если области 1, 3, 4 и 6 (рис. 2) имеют одинаковые параметры, то $m_{45}m_{56} = m_{12}m_{23} = 1$, и если в них отсутствует проводимость, то $k_{z3} = k_{z4} = i(k_x^2 + k_y^2)^{0,5}$. В этом случае формулы (16) и (17) упрощаются.

При одинаковых параметрах полотен $m_{23} = 1/m_{45}$ и если, кроме того, они имеют одинаковую толщину ($\Delta_B = \Delta_H$) и удалены от токовой рамки на одно и то же расстояние ($h_2 = h_4$), то $c_{x4} = -d_{x3}$, т.е. тангенциальные компоненты вихревого поля в плоскости токовой рамки отсутствуют.

Электромагнитная сила, действующая на токовую рамку, создается за счет взаимодействия вещественной части индукции вихревого поля с током в рамке.

Обозначим, $B(z) = B'(z) + iB''(z)$, где

$$B(z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(k) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y;$$

$B(k)$ – вихревое поле в плоскости токовой рамки, компоненты которого определяются соотношениями (13). Тогда для электромагнитной силы получим:

$$F_x = I \int_{-a}^a [B'_z(-b, y) - B'_z(b, y)] dy; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F_z &= I \int_{-a}^a [B'_x(b, y) - B'_x(-b, y)] dy + \\ &+ I \int_{-b}^b [B'_y(x, a) - B'_y(x, -a)] dx, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\pm a, \pm b$ – координаты, определяющие конфигурацию токовой рамки.

Частные случаи. 1. Допустим, что одно из полотен отсутствует, например верхнее. В этом случае $d_{x3} = 0$. Соотношение для c_{x4} получим из (14), (16) и (17), полагая $\Delta_B = 0$ и $m_{12}m_{23} = 1$:

$$c_{x4} = \frac{\mu_0 J_y(k)}{2} \frac{V_1(k)}{V_3(k)}. \quad (20)$$

Этот результат при соответствующих обозначениях совпадает с данными [3].

2. Пусть толщина полотен значительно превышает глубину проникновения поля. Тогда толщины пластин можем считать бесконечно большими. В этом случае в (16) и (17) нужно положить $m_{12}m_{56} = 1$, так как области, к которым относятся эти величины, имеют одни и те же параметры μ и σ . Кроме того,

$$\lim_{\Delta_B \rightarrow 0} \text{ctg}(k_{z2}\Delta_B) = -i; \quad \lim_{\Delta_H \rightarrow 0} \text{ctg}(k_{z5}\Delta_H) = -i.$$

Поэтому из (16) и (17) следует:

$$\begin{aligned} c_{x4} &= \frac{\mu_0 J_y(k)}{2} \times \\ &\times \frac{(1 - m_{45}) [(1 + m_{23}) - (1 - m_{23}) e^{-2kh_2}]}{(1 + m_{23})(1 + m_{45}) e^{-2kh_4} - (1 - m_{23})(1 - m_{45}) e^{-2kh_2}}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} d_{x3} &= \frac{\mu_0 J_y(k)}{2} \times \\ &\times \frac{(1 - m_{23}) [(1 + m_{45}) - (1 - m_{45}) e^{-2kh_4}]}{(1 + m_{23})(1 + m_{45}) e^{-2kh_2} - (1 - m_{23})(1 - m_{45}) e^{-2kh_4}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Обозначим:

$$m_{23} = \frac{\mu_2}{\mu_0} (k_x^2 + k_y^2 - i\mu_2\sigma_2\nu k_x)^{0,5} = \frac{1}{\alpha_1 - i\alpha_2}; \quad (23)$$

$$m_{45} = \frac{\mu_0}{\mu_5} \frac{(k_x^2 + k_y^2 - i\mu_5\sigma_5\nu k_x)^{0,5}}{k} = \frac{1}{\beta_1 - i\beta_2}. \quad (24)$$

Тогда при $h_2 = h_4 = h$ получим следующие соотношения для электромагнитных сил:

$$F_x = \frac{8\mu_0 I^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k}{k_x k_y^2} Z_x(k) \sin^2(k_x b) \sin^2(k_x a) dk_x dk_y; \quad (25)$$

$$F_z = \frac{8\mu_0 I^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{k_x^2} + \frac{1}{k_y^2} \right) Z_z(k) \times \sin^2(k_x b) \sin^2(k_x a) dk_x dk_y. \quad (26)$$

Здесь

$$Z_x(k) = \frac{\left[\alpha_2 (1 + \beta_1^2 + \beta_2^2) + \beta_2 (1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2) \right] ch(2kh) + 2(\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1) sh(2kh) + \alpha_2 (1 - \beta_1^2 - \beta_2^2) + \beta_2 (1 - \alpha_1^2 - \alpha_2^2)}{\left[(\alpha_1 + \beta_1) ch(2kh) + (1 + \alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2) sh(2kh) \right]^2 + \left[(\alpha_2 + \beta_2) ch(2kh) + (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) sh(2kh) \right]^2}; \quad (27)$$

$$Z_z(k) = \frac{\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - \beta_1^2 - \beta_2^2 \right) ch(2kh) + \left[\alpha_1 (1 - \beta_1^2 - \beta_2^2) - \beta_1 (1 - \alpha_1^2 - \alpha_2^2) \right] sh(2kh)}{\left[(\alpha_1 + \beta_1) ch(2kh) + (1 + \alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2) sh(2kh) \right]^2 + \left[(\alpha_2 + \beta_2) ch(2kh) + (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) sh(2kh) \right]^2}. \quad (28)$$

Если имеется только одно из полотен, например верхнее, то $m_{45} = 1$ в соответствии с (24) в (27), и (28) надо положить $\beta_1 = 1$. При наличии только нижнего полотна имеем $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$. В последнем случае из (27) и (28) следует:

$$Z_x(k) = \frac{2\beta_2}{(1 + \beta_1)^2 + \beta_2^2} e^{-2kh}; \quad (29)$$

$$Z_z(k) = - \left[1 - \frac{2(1 + \beta_1)}{(1 + \beta_1)^2 + \beta_2^2} \right] e^{-2kh}. \quad (30)$$

При использовании (29) и (30) значения сил, полученные из соотношений (25) и (26), совпадают с данными [4] вплоть до обозначений.

Влияние вихревых токов в ферромагнитном полотне. Если верхнее (ферромагнитное) полотно обладает значительной проводимостью, то вихревые токи этого полотна заметно снизят левитационную силу F_z и увеличат тормозную силу F_x , что нежелательно. Поэтому верхнее полотно необходимо изготовить из ферромагнитных пластин, изолированных друг от друга, т.е. шихтованным. В этом случае вихревые токи в полотне будут отсутствовать, и это можно учесть, полагая $\sigma_2 = 0$ в формуле (23). Тогда в (27) и (28) необходимо положить $\alpha_1 = \mu_0/\mu_2$, $\alpha_2 = 0$. Результаты расчетов по (25) и (26),

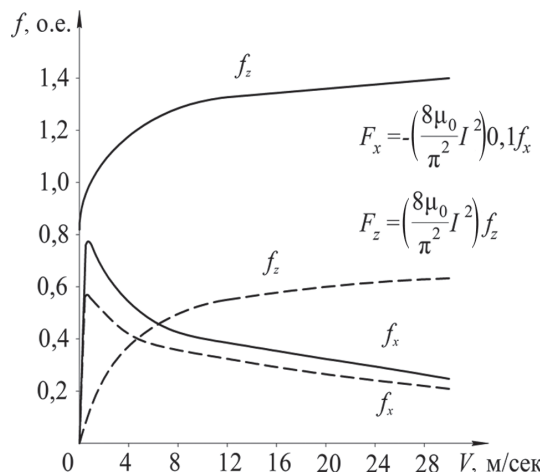


Рис.3. Зависимости левитационной и тормозной сил от скорости экипажа

Fig. 3. The dependences of the levitation and braking forces on the speed of the vehicle

выполненных при этом предположении, приведены на рис. 3. Здесь сплошные кривые соответствуют гибридной системе ($\sigma_2 = 0$, $\mu_2 = 1000\mu_0$, $\sigma_5 = 3,57 \cdot 10^7$ 1/Ом·м, $\mu_5 = \mu_0$, $h = 0,3$ м). Штриховые кривые соответствуют традиционной системе с одним рабочим полотном ЭДП ($\sigma_5 = 3,57 \cdot 10^7$ 1/Ом·м, $\mu_5 = \mu_0$, $h = 0,3$ м).

Кривые на рис. 3 подтверждают возможность реализации левитации экипажа в состоянии покоя и при низких скоростях, если обычную левитационную систему ЭДП дополнить на участках стоянки, разгона и торможения ферромагнитным полотном. Некоторое увеличение тормозной силы, обусловленное наличием ферромагнитного полотна, не отразится на мощности тягового двигателя, но оно может быть выгодно использовано при торможении экипажа.

Выводы. Расчетами подтверждена возможность обеспечения магнитной левитации в режимах движения с малыми скоростями при использовании дополнительного ферромагнитного полотна, расположенного на путевых структурах над экипажным соленоидом возбуждения.

По соотношениям (14) – (19), (23) и (24) можно рассчитать все необходимые характеристики гибридной системы левитации рассматриваемого типа. В частности, соответствующими вычислениями можно определить толщину ферромагнитного полотна и рабочий зазор между ним и соленоидом возбуждения, а также параметры этого полотна, при которых обеспечивается требуемое значение левитационной силы в условиях низких скоростей движения экипажа.

Для уменьшения влияния вихревых токов, индуцированных в ферромагнитном полотне, на левитационную силу F_z и для уменьшения тормозной силы F_x верхнее ферромагнитное полотно необходимо изготовить шихтованным из ферромагнитных пластин, изолированных друг от друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ким К.К.** Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007, 360 с.
2. **Никитин В.В., Стрепетов В.М.** Оценка энергетической эффективности пусковых режимов работы комбинированной системы левитации и тяги на однофазном переменном токе. – Известия Петербургского университета путей сообщения, 2006, № 2(7), с. 145–159.
3. **Чун-ву Ли, Менендес Р.С.** Сила, действующая на катушки с током, движущиеся над проводящим листом, и ее применение для магнитной левитации. – Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике, 1974, т. 62, № 5, с. 28–29.
4. **Borcherts R.H., Davis L.C., Reitz J.R., Wilkie D.F.** Baseline specifications for a magnetically suspended high speed vehicle. – Proceedings of the IEEE, 1973, vol. 61, No.5., pp. 569–578.
5. **Kim K.K., Kim K.I.** Suspension system of hyperloop. – Транспортные системы и технологии, 2017, т. 3, № 2, pp. 9–10.
6. **Ким К.К., Колесова А.В., Колесов С.Л.** Улучшение токо-сёма в транспортной системе типа "Hyperloop". – Транспортные системы и технологии, 2019, т. 5, №2, с. 5–15.
7. **Титова Т.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В.** The Use of Energy Storages to Increase the Energy Effectiveness of Traction Rolling Stock. – Russian Electrical Engineering, 2018, vol. 89, No. 10, pp. 576–580.
8. **Nikitin V.V., Marikin A.N., Tret'yakov A.V.** Generator cars with hybrid power plants. – Russian Electrical Engineering, 2016, vol. 87, No. 5, pp. 260–265.
9. **Baiko A.V., Nikitin V.V., Sereda E.G.** Autonomous power systems with synchronous generators and hydrogen energy sources. – Russian Electrical Engineering, 2015, vol. 86, No. 8, pp. 479–484.
10. **Хожанинов А.И., Никитин В.В.** Электромагнитная совместимость сверхпроводниковых и традиционных электрических машин. – Электричество, 2003, № 5, с. 36–42.
11. **Khozhainov A.I., Nikitin V.V.** A superconducting homopolar traction motor with an internal exciting winding. – Electrical Technology Russia, 2000, No. 3, pp. 76–81.
12. **Хожанинов А.И., Никитин В.В.** Автономная тяговая электрическая передача со сверхпроводниковыми электрическими машинами и индуктивным накопителем. – Электричество, 1996, № 10, с. 24–27.

13. **Кузнецов А.А., Мешкова О.Б.** Модернизация спектрального оборудования для диагностирования и ремонта подвижного состава. – Транспорт Урала, 2009, № 2, с. 86–90.

14. **Ким К.К.** Вариант вакуумной транспортной системы. – Железнодорожный транспорт, 2016, № 12, с. 67–68.

15. **Almujibah H., Kaduk S.I., Preston J.** Hyperloop – prediction of social and physiological costs. – Транспортные системы и технологии, 2020, т. 6, № 3, с. 43–59.

16. **Janic M.** Multicriteria evaluation of the high speed rail, transrapid maglev and hyperloop systems. – Транспортные системы и технологии, 2018, т.4, № 4, с. 5–31.

[17.07.2020]



Авторы: Ким Константин Иванович – доктор техн. наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.



Ким Константин Константинович – доктор техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.



Вешкин Вадим Витальевич – аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Magnetic Field and Forces in a Hybrid Levitation System for a High-Speed Vehicle

KIM Konstantin I. (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia) – Professor of the Dept. “Foundations of Theoretical Electrical Engineering”, Dr. Sci. (Eng.).

KIM Konstantin K. (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia) – Head of the Dept. “Electrical and Heat Engineering”, Dr. Sci. (Eng.)

VESHKIN Vadim V. (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia) – Graduate Student of the Dept. “Electrical and Heat Engineering”.

A hybrid system designed to provide levitation for a high-speed on-ground vehicle at low traveling speeds is considered. The levitation is obtained due to the simultaneous use of electrodynamic repulsion forces and electromagnetic attraction forces. Structurally, this is implemented by using two longitudinal tracks. One of them, which is electrically conducting and nonmagnetic, is located under the vehicle excitation solenoid, and the second one, which is ferromagnetic, is arranged above the vehicle excitation solenoid only on the acceleration, braking and station sections. To ensure the equality of the resulting levitation force to

the vehicle weight on all of these motion sections, the ferromagnetic track is made so that its area that participates in producing the attraction force varies depending on the vehicle motion speed. To avoid the negative effect of eddy currents induced in the ferromagnetic track, the latter is made of plates electrically insulated from each other. In performing the design calculations, the tracks were represented as plates of infinite size. An analytical solution for the magnetic field and levitation forces is obtained. It is shown that in particular cases, the results obtained from these solutions coincide with the results obtained previously by other authors for the conventional repulsion levitation system. The possibility of levitation at low speeds and stops is confirmed, and it is pointed out that a somewhat growth in the braking force does not have an essential influence on the traction linear motor power output.

Key words: levitation, electrodynamic force, electromagnetic force, superconductive excitation solenoid, vehicle, magnetic field

REFERENCES

1. **Kim K.K.** *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverkhprovodimosti (Electric propulsion systems using magnetic suspension and superconductivity)*. M.: GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2007, 360 p.
2. **Nikitin V.V., Strepetov V.M.** *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – in Russ. (Proceedings of Petersburg Transport University)*, 2006, No. 2(7), pp. 145–159.
3. **Shung-Wu Lee, Menendez R.C.** *Trudy instituta inzhenerov po elektronike i radioelektronike – in Russ. (Proceedings of the Institute of Electronics and Radio Electronics Engineers)*, 1974, vol.62, No. 5, pp. 28–29.
4. **Borcherts R.H., Davis L.C., Reitz J.R., Wilkie D.F.** Baseline specifications for a magnetically suspended high speed vehicle. – *Proceedings of the IEEE*, 1973, vol. 61, No.5., pp. 569–578.
5. **Kim K.K., Kim K.I.** *Transportnye sistemy i tekhnologii – in Russ. (Transportation Systems and Technology)*, 2017, vol. 3, No. 2, pp. 9–10.
6. **Kim K.K., Kolesova A.V., Kolesov S.L.** *Transportnye sistemy i tekhnologii – in Russ. (Transportation Systems and Technology)*, 2019, vol. 5, No. 2, pp. 5–15.
7. **Titova T.S., Evstaf'ev A.M., Nikitin V.V.** The Use of Energy Storages to Increase the Energy Effectiveness of Traction Rolling Stock. – *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, No. 10, pp. 576–580.
8. **Nikitin V.V., Marikin A.N., Tret'yakov A.V.** Generator cars with hybrid power plants.– *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, No. 5, pp. 260–265.
9. **Baiko A.V., Nikitin V.V., Sereda E.G.** Autonomous power systems with synchronous generators and hydrogen energy sources. – *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, No. 8, pp. 479–484.
10. **Khozhainov A.I., Nikitin V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2003, No. 5, pp. 36–42.
11. **Khozhainov A.I., Nikitin V.V.** A superconducting homopolar traction motor with an internal exciting winding. – *Electrical Technology Russia*, 2000, No. 3, pp. 76–81.
12. **Khozhainov A.I., Nikitin V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1996, № 10, c. 24–27.
13. **Kuznetsov A.A., Meshkova O.B.** *Transport Urala – in Russ. (Transport of the Urals)*, 2009, No. 2, pp. 86–90.
14. **Kim K.K.** *Zheleznodorozhnyy transport – in Russ. (Railway Transport)*, 2016, No. 12, pp. 67–68.
15. **Almujibah H., Kaduk S.I., Preston J.** *Transportnye sistemy i tekhnologii – in Russ. (Transportation Systems and Technology)*, 2020, vol. 6, No. 3, pp. 43–59.
16. **Janic M.** *Transportnye sistemy i tekhnologii – in Russ. (Transportation Systems and Technology)*, 2018, vol. 4, No. 4, pp. 5–31.

[17.07.2020]