

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 629.439  
DOI10.17816/transsyst20228491-106

© **К.К. Ким, И.М. Карпова**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПОДВЕСА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

**Цель:** выработать рекомендации по разработке оптимальных конструктивных схем систем из постоянных магнитов, предназначенных для создания силы подвеса.

**Методы:** электромагнитное взаимодействие в системе описывалось с помощью классической теории поля, использовался принцип суперпозиции, расчет сил выполнялся с помощью метода зеркальных отображений и квадратурных формул Чебышева.

**Результаты:** увеличение количества рядов магнитов с чередующейся полярностью приводит к возрастанию результирующей напряженности размагничивающего поля, а в случае без чередования полярностей наблюдается обратный эффект. Сила подвеса достигает максимума при определенном расстоянии между рядами из постоянных магнитов. Боковая сила в системе подвеса горизонтального типа достигает максимума при определенной величине поперечного смещения. Регулировка несущей способности подвеса изменением размеров поперечных сечений постоянных магнитов сопровождается увеличением расхода их магнитного материала. Наличие ферромагнитной шины значительно улучшает характеристики подвеса и благотворно влияет на устойчивость подвеса.

**Заключение:** целесообразно использование многорядных структур на путевом полотне и на экипаже с определенным шагом установки магнитных полос с чередующейся полярностью, причем на величину электромагнитных сил влияет расстояние между полосами. Выбор размеров поперечного сечения постоянных магнитов должен осуществляться с учетом конкретных требований к системе подвеса, принимая во внимание обратимость процесса перемагничивания.

**Ключевые слова:** постоянный магнит, магнитный подвес, экипаж, путевое полотно, многорядная структура, перемагничивание.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS  
Field – Electrotechnology and Electrophysics

©**К.К. Kim, I.M. Karpova**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)

## ON THE ISSUE OF THE DEVELOPMENT OF PERMANENT MAGNET SUSPENSION SYSTEMS FOR TRANSPORT SYSTEMS

**Aim:** to develop recommendations for the development of optimal design schemes of permanent magnet systems designed to create a suspension force.

**Methods:** we described the electromagnetic interaction in the system using classical field theory, the principle of superposition was used, the forces were calculated using the method of mirror images and Chebyshev quadrature formulas.

**Results:** an increase of the number of rows of magnets with alternating polarity leads to an increase in the resulting strength of the demagnetizing field and there is the opposite effect in the case without alternating polarities. The suspension force reaches its maximum at a certain distance between the rows of permanent magnets. The side force reaches a maximum at a certain amount of transverse displacement in the horizontal suspension system. The control of the loading capacity of the suspension by changing the size of the cross sections of permanent magnets is accompanied by an increase their mass of the magnetic material. The presence of a ferromagnetic buss significantly improves the characteristics of the suspension and has a beneficial effect on the stability of the suspension.

**Conclusion:** it is advisable to use multi-row structures on the track and on the vehicle with a certain step of installing magnetic rows with alternating polarity and the distance between the rows affects the magnitude of electromagnetic forces. The choice of the cross-sectional dimensions of permanent magnets should be carried out taking into account the specific requirements for the suspension system, taking into account the reversibility of the remagnetization process.

**Key words:** permanent magnet, magnetic suspension, vehicle, track, multi-row structure, remagnetization.

### ВВЕДЕНИЕ

Сфера использования магнитного подвеса, в котором левитация экипажа осуществляется с помощью постоянных магнитов (ПМ), установленных как на экипаже, так и на путевом полотне, в основном ограничивается промышленным и низкоскоростным пассажирским транспортом. Однако, возможно использование такого типа магнитного подвеса и при высоких скоростях движения в комбинации с электромагнитным или электродинамическим подвесом. В последнем случае функционирование магнитного подвеса на ПМ предполагается на участках стоянки, разгона и торможения[1]. Весьма интересно предложение по применению магнитной сборки Хальбаха, в этом случае параллельно решается задача обеспечения требуемого уровня магнитного поля в пассажирском салоне экипажа [2].

К наиболее общим требованиям к ПМ, употребляемым в таких системах подвеса, можно отнести следующие: всепогодность, сохранение работоспособности и стабильности характеристик в магнитных полях (в условиях размагничивания) и в широком интервале температур окружающей среды. В свете этих требований наиболее приемлемыми

являются ПМ, изготавливаемые из  $BaFe$  и  $SrO \cdot 6Fe_2O_3$ , из-за их сравнительно низкой стоимости в сочетании с высокими магнитными качествами. Особо следует отметить ПМ на основе редкоземельных элементов, в частности  $SmCo_5$  и  $NdFeB$ , обладающих значительно лучшими магнитными характеристиками в сравнении с  $BaFe$ .

Известно, что при колебаниях температуры кривая намагничивания вещества ПМ «деформируется» и положение рабочей точки изменяется. По условию обратимости процессов перемагничивания при изменении температуры окружающей среды рабочая точка не должна попадать в зону колена кривой намагничивания или ниже ее. При анализе работоспособности ПМ необходимо помнить, что на них в системе подвешивания размагничивающе воздействуют собственное и внешнее магнитные поля, величина которых зависит от размеров магнитов и их основных магнитных характеристик.

Если рассмотреть ПМ с прямоугольным поперечным сечением с размерами:  $a$  и  $h$ , то можно определить допустимую величину отношения этих размеров  $\nu = a/h$  с учетом температуры окружающей среды:

$$\left| \frac{q(J_r - \chi_r H_{ZBH})}{qH_{ZBH} + I_r} \right| \geq \operatorname{tg} \alpha_{\text{п}},$$

где  $J_r$  – остаточная намагниченность,  $\chi_r$  – реверсивная восприимчивость магнитного материала,  $H_{ZBH}$  – вертикальная составляющая напряженности внешнего поля, в котором находится ПМ,  $\alpha_{\text{п}}$  – предельно допустимый угол наклона линии нагрузки,  $q$  – коэффициент, определяемый по формуле  $q = J/H_{\text{ср.}\Delta V}$ , где  $H_{\text{ср.}\Delta V}$  – среднее значение напряженности магнитного поля в объеме  $\Delta V$  [3].

## ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В системах подвеса, как правило, находят применение многорядные магнитные системы, в которых ПМ в виде магнитных полос работают в режимах отталкивания и притягивания. На Рис. 1 приведены схемы расположения рядов ПМ в магнитных системах: горизонтального (ПМГ) и вертикального типов [4–8].

На Рис. 1 б, в, г для уменьшения потоков рассеяния магнитные полосы расположены на ферромагнитных шинах (ФШ).

Для случаев, показанных на Рис. 1 при различных значениях зазора  $\delta$  и относительного смещения  $\tilde{y}$  магнитных систем в каждой элементарной зоне сечения магнитной полосы вектора  $\mathbf{H}_R$  и  $\mathbf{I}$  параллельны.

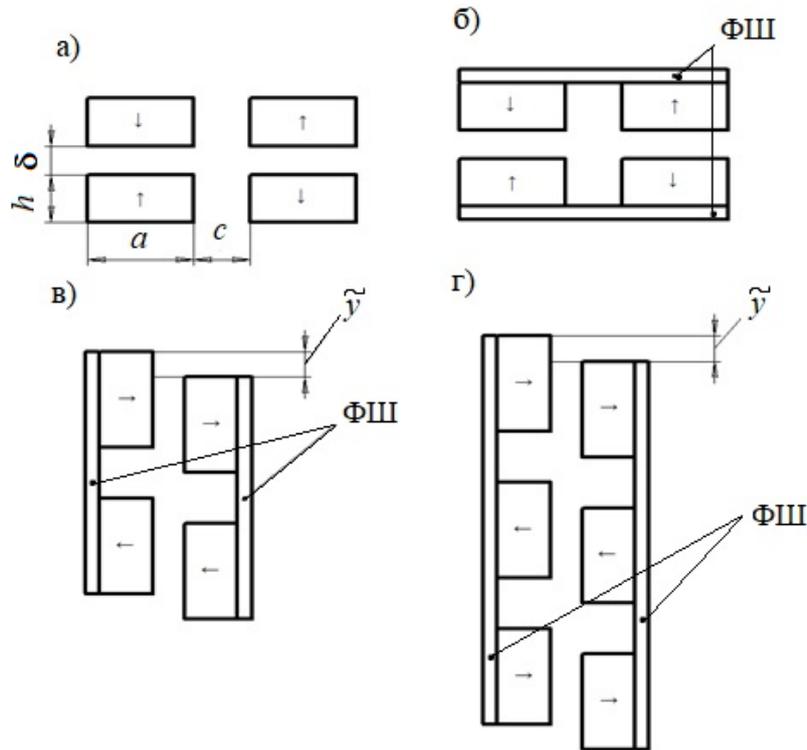


Рис. 1. Магнитные системы горизонтального (а, б) и вертикального типа (в, г)

Поэтому результирующую напряженность  $H_R$  размагничивающего магнитного поля можно определить следующим образом:

$$H_R = \frac{0,95J_r}{x_r \cdot \int_{i \cdot \Delta y}^{(i+1) \cdot \Delta y} dy \int_{k \cdot \Delta z}^{(k+1) \cdot \Delta z} H_z \cdot dz} + H_{ZBH}, \quad (1)$$

здесь  $H_{ZBH}$  – результирующая напряженность внешнего магнитного поля, создаваемого всеми магнитами, системы, за исключением рассматриваемого, она направлена по оси намагничивания; остальные обозначения поясняются Рис. 2.

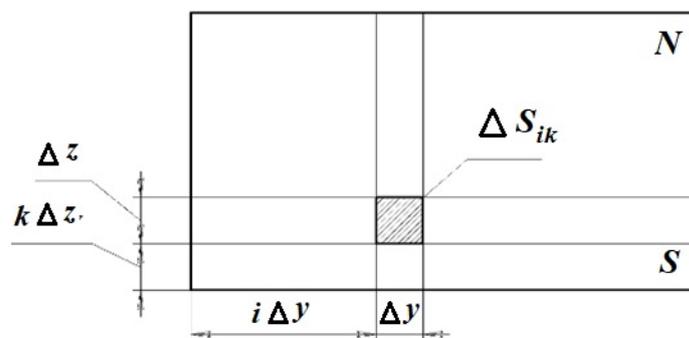


Рис. 2. Расчетная схема ПМ

Работа магнита носит обратимый характер, если выполняется условие:

$$|H_{Z\text{собств}} + H_{ZBH}| \leq |H_{\text{пер}}|,$$

где  $H_{Z\text{собств}}$  – напряженность собственного размагничивающего поля. В (1) ей отвечает первое слагаемое;  $H_{\text{пер}}$  – напряженность магнитного поля, которой соответствует начало перегиба кривой размагничивания.

В рамках линейной постановки при определении напряженности внешнего магнитного поля можно использовать принцип суперпозиции, т.е. суммировать напряженности магнитных полей, создаваемых в рассматриваемой области каждой «заряженной» гранью всех ПМ системы. Результаты расчетов показали, что существуют «опасные» зоны сечения магнитной полосы с точки зрения их размагничивания при значениях зазора  $\delta$ , равных номинальному. Выявлено, что минимально допустимое значение  $v = h/a$ , определяющее оптимальные размеры магнитов, зависит от величины  $\lambda = |H_{\text{пер}}| / J_r$ .

При переходе от однорядной к многорядной магнитной системе, в которой полярность граней чередуется, существенно возрастает  $H_R$ . Однако при установке магнитных полос без чередования полярностей наблюдается и обратный эффект. Например, переход от одной к трем полосам с чередованием полярностей приводит к увеличению  $H_R$  примерно в 1,5 раза в середине поверхности центрального магнита и к уменьшению  $H_R$  в 2 раза при отсутствии чередования полярностей [9].

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПМ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕФЕРРОМАГНИТНУЮ ОСНОВУ, ПРИ СТОЯНКЕ ЭКИПАЖА

Рассматривается случай, когда ПМ установлены на путевом полотне и экипаже.

Электромагнитное взаимодействие ПМ может быть описано с помощью классической теории поля. Предположим, что ПМ имеют прямоугольную форму сечения, а вектор намагниченности постоянен по всему объему магнитов ( $\mathbf{J} = \text{const}$ ).

Рассмотрим простейший пример – пару отталкивающихся ПМ (Рис. 3). Введем в рассмотрение фиктивные магнитные заряды вместо полюсных поверхностей (Рис. 3а). На Рис. 3б – расчетная схема, на которой изображены две «заряженные» грани. Плотность фиктивных магнитных зарядов  $\sigma_m = \pm \mu_0 J$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

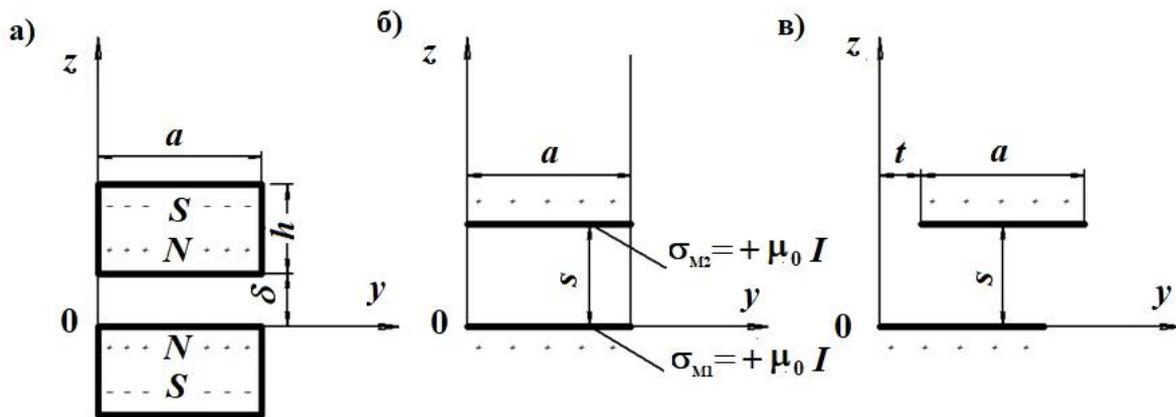


Рис. 3. Представление полюсных поверхностей слоями фиктивных магнитных зарядов

В [3] приводятся результаты решения уравнения Лапласа для скалярного потенциала  $\Delta\varphi = 0$  для двумерного поля, созданного плоскостью с равномерно распределенным на ней зарядом [3, 10–14].

$z$  и  $y$ -составляющие напряженности магнитного поля можно найти по формулам  $H_z = -\nabla_z\varphi$  и  $H_y = -\nabla_y\varphi$ , можно найти:

$$H_z = -\frac{\sigma_{M1}}{2\pi\cdot\mu_0} \left( \operatorname{arctg}\frac{y}{z} - \operatorname{arctg}\frac{y-a}{z} \right),$$

$$H_y = -\frac{\sigma_{M1}}{4\pi\cdot\mu_0} \left\{ \ln(y^2 + z^2) - \ln[(a-y)^2 + z^2] \right\}.$$

Вертикальная (сила подвеса) и горизонтальная составляющие силы взаимодействия граней единичной длины равны

$$f_z = \sigma_{M2} \int_t^{t+a} H_z dy, \quad f_y = \sigma_{M2} \int_t^{t+a} H_y dz,$$

и после интегрирования примут вид (при  $\sigma_{M1} = \sigma_{M2} = \sigma$ )

$$f_z = \frac{\sigma_M^2}{2\pi\cdot\mu_0} \left\{ (t+a) \operatorname{arctg}\frac{t+a}{s} - 2t \operatorname{arctg}\frac{t}{s} + (t-a) \operatorname{arctg}\frac{t-a}{s} + \frac{s}{2} \ln \frac{(s^2+t^2)}{[s^2+(t-a)^2][s^2+(t+a)^2]} \right\},$$

$$f_y = \frac{\sigma_M^2}{4\pi\cdot\mu_0} \left\{ 2S \left( \operatorname{arctg}\frac{t+a}{s} - 2 \operatorname{arctg}\frac{t}{s} + \operatorname{arctg}\frac{t-a}{s} \right) + (t+a) \ln[(t+a)^2 + S^2] - 2t \ln(t^2 + S^2) + (t-a) \ln[(t-a)^2 + S^2] \right\}.$$

Можно говорить о целесообразности использования в системах магнитного подвеса многорядных структур на путевом полотне и на экипаже с определенным шагом установки магнитных полос с чередующейся полярностью. В этом случае величина силы подвеса  $f_z$ , приведенная к одной паре полос путевого полотна и экипажа, значительно возрастает и может быть описана формулой:

$$f_{z,n} = 2\pi \sum_{j=0}^{j=2} \frac{(-1)^j}{j!(2-j)!} \cdot f_z(\tilde{y}, \delta + jh) + 4 \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=0}^{j=2} (-1)^{i+j} \frac{(n-i)}{j!(2-j)!} \cdot f_z[i(a+c) + \tilde{y}, \delta + jh],$$

где  $\tilde{y}$  – относительное боковое смещение магнитов путевого полотна и экипажа;  $c$  – расстояние между соседними рядами (полосами). Рис. 4 иллюстрирует характер изменения силы  $f_{z,n}$  с ростом количества полос ( $n$ ).

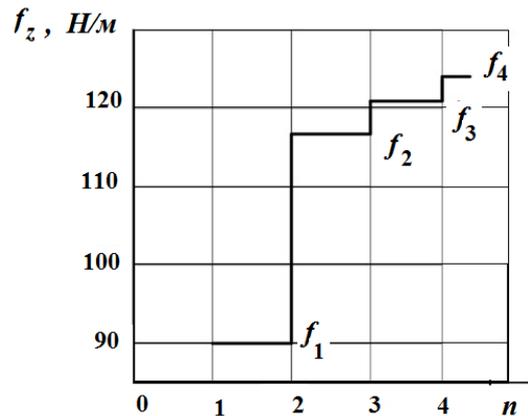


Рис. 4. Зависимость силы подвеса от количества полос

Боковая сила определяется выражением:

$$f_{y,n} = 2n \sum_{j=0}^2 \frac{(-1)^j}{j!(2-j)!} f_y(\tilde{y}, \delta + jh) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (1)^{i+j} \{f_y[i(a+c) + \tilde{y}, \delta + jh] - f_y[i(a+c) - \tilde{y}, \delta + jh]\} \frac{n-i}{j!(2-j)!}.$$

При установке магнитных полос на путевом полотне и на экипаже необходимо учитывать зависимость  $f_{z,n}$  и  $f_{y,n}$  от расстояния между полосами. Анализ силы подвеса  $f_{z,n}$  показал, что она при вариациях  $a$  и  $h$  в широких пределах достигает максимума при  $c \approx 0,01$  м.

Оценить качество магнитного подвеса можно с помощью показателей эффективности ( $q_1$ ) и устойчивости подвешивания ( $q_2$ ), которые определяются следующим образом:  $q_1 = f_z / P$  и  $q_2 = f_z / f_y$ , где  $P$  – вес ПМ. Показатель эффективности предоставляет возможность контролировать «качество» системы подвеса при нахождении её параметров для конкретного случая. Этот показатель и показатель устойчивости могут быть взяты в качестве целевых функций при решении задач по оптимизации. Расчеты показали, что для ПМГ при  $\delta = 10$  мм показатель эффективности составляет 10, а при  $\delta = 7,5$  мм –  $q_1 \approx 12-13$ .

Естественно, что при разработке систем магнитного подвеса такого рода необходимо стремиться к достижению высоких значений  $q_1$  и  $q_2$ .

Выбор размеров  $a$  и  $h$  должен осуществляться в каждом конкретном случае с учетом требований, предъявляемых к системе подвеса. Одновременно с этим необходимо осуществлять контроль размеров ПМ, принимая во внимание обратимость процесса перемагничивания.

В зависимости боковой силы, действующей на экипаж, от его бокового смещения, в системе с ПМГ наблюдается максимум. После достижения максимума боковая сила начинает уменьшаться, однако этот случай выходит за рамки реально допустимых  $\tilde{y}$  (Рис. 5). На Рис. 6 показаны «кривые сползания» ПМ, иллюстрирующие уменьшение зазора  $\delta$  с ростом  $\tilde{y}$ .

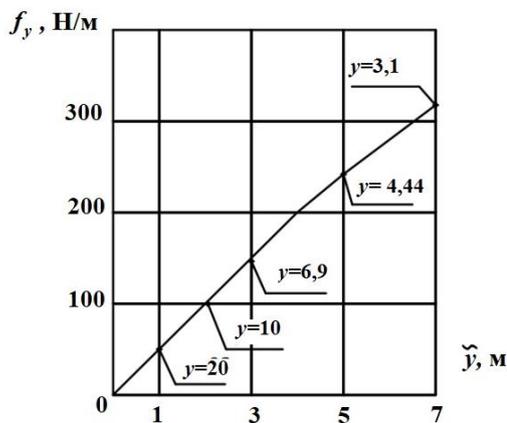


Рис. 5. Зависимость боковой силы от бокового смещения

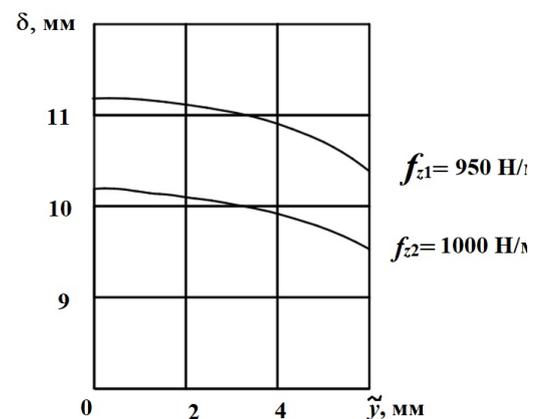


Рис. 6. Зависимости величины воздушного зазора от бокового смещения

Иногда целесообразно использовать на путевом полотне и на экипаже ПМ разных размеров ( $a_1 \times h_1$  и  $a_2 \times h_2$ ). В этом случае формулы для вертикальной и боковой сил принимают вид:

$$f_z = \frac{\mu_0 J^2}{2\pi} \int_{-\frac{1}{2}(a_2-a_1)+\tilde{y}}^{\frac{1}{2}(a_1+a_2)+\tilde{y}} \left( \arctg \frac{y}{\delta+h_2} - \arctg \frac{y}{\delta} + \arctg \frac{y-a_1}{\delta+h_1+h_2} - \arctg \frac{y-a_1}{\delta+h_1} - \arctg \frac{y}{\delta+h_1+h_2} + \arctg \frac{y}{\delta+h_1} - \arctg \frac{y-a_1}{\delta+h_2} + \arctg \frac{y-a_1}{\delta} \right) dy,$$

$$f_y = \frac{\mu_0 J^2}{2\pi} \int_{\delta}^{\delta+h_2} \left[ \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_1+a_2)}{z} - \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z} + \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z+h_1} - \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z+h_1} - \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_2+a_1)}{z+h_1} + \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z+h_1} - \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z} + \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2+a_1)}{z} \right] dz.$$

В результате анализа этих зависимостей можно говорить, что  $f_z$  достигает максимума при изменении  $a_2$  ( $a_2 \neq a_1$ ) при  $f_z = f_{z\max}$ . Сравнение показателей эффективности  $q_{1(1)}$  и  $q_{1(2)}$  показывает, что  $q_{1(1)}$  достигает значений, заметно бóльших нежели  $q_{1(2)}$ , а так же  $q_{1(2)\max}$ , определяемом при

данном  $h_2$ . Например, при  $\delta = 7,5$  мм,  $a_2 = 40$  мм,  $h_2 = 45$  мм имеем  $q_{1(1)} = 17,1$ ,  $q_{1(2)} = 3,8$  и  $q_{1(2)\max} = 5,0$ . Если на экипаже установлены ПМ с размерами  $a_1$  и  $h_1$ , то их несущая способность будет достаточно высокой, но одновременно возрастает расход магнитного материала путевого ПМ. Возможен альтернативный вариант: можно установить магниты с размерами  $a_1$  и  $h_1$  на путевом полотне, тогда расход магнитного материала на путевом полотне значительно снизится, но упадет грузоподъемность системы. Поэтому решение по выбору размеров экипажных и путевых магнитов нужно принимать с учетом требований каждого конкретного случая.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭКИПАЖНЫХ И ПУТЕВЫХ ПМ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ФЕРРОМАГНИТНУЮ ОСНОВУ, ПРИ СТОЯНКЕ ЭКИПАЖА

При установке магнитных полос на путевые ферромагнитные шины (ФШ) вертикальная сила взаимодействия магнитных систем путевого полотна и экипажа возрастает, причем лучшим из возможных вариантов являются шины плоской формы. Они просты по конструкции, удобны при разработке конструкций путевого полотна и экипажа, их эксплуатация не требует значительных затрат.

Использование ФШ уменьшает потоки рассеяния, способствует концентрации магнитных полей в зоне рабочего зазора. Однако, наличие ФШ приводит к увеличению не только силы подвеса, но и боковой силы.

Силы  $f_z$  и  $f_y$  можно найти методом зеркальных отображений, для этого используется расчетная схема для одной пары полос (Рис. 7).

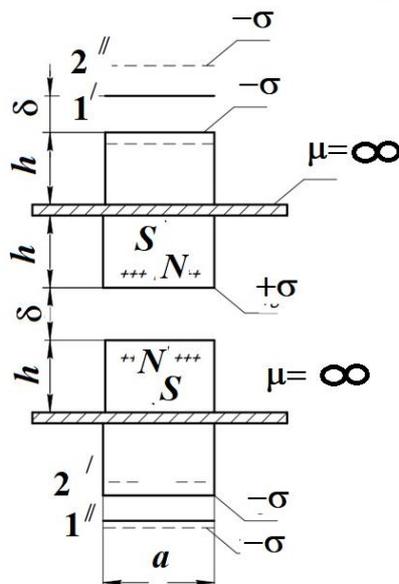


Рис. 7. Расчетная схема для метода зеркальных отображений

Здесь заряженным граням 1 и 2 соответствуют отображения, помеченные соответствующей цифрой со штрихом.

Принимаемые допущения:

1) относительная магнитная проницаемость вещества ФШ – бесконечно большая;

2) рассматриваются только первые отображения;

3) влиянием полей граней ПМ, находящихся на ФШ, пренебрегаем.

Выражение для силы подвеса  $n$  магнитных полос имеет следующий вид:

$$f_{z,n} = n \left[ f_z(\tilde{y}, \delta) - 2f_z(\tilde{y}, \delta + 2h) - 2f_z(\tilde{y}, 2\delta + 2h) + f_z(\tilde{y}, \delta + 4h) + 2f_z(\tilde{y}, 2\delta + 2h) + \right. \\ \left. + f_z(\tilde{y}, 3\delta + 4h) \right] + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (-1)^i (n-i) \left\{ f_z(\tilde{y} + i(a+c), \delta) - 2f_z(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 2h) - \right. \\ \left. - 2f_z(\tilde{y} + i(a+c), 2\delta + 2h) + f_z(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 4h) + 2f_z(\tilde{y} + i(a+c), 2\delta + 4h) + f_z(\tilde{y} + i(a+c), 3\delta + 4h) \right\};$$

а боковая сила определяется следующей формулой:

$$f_{y,n} = n \left[ f_y(\tilde{y}, \delta) - 2f_y(\tilde{y}, \delta + 2h) + f_y(\tilde{y}, \delta + 4h) - f_y(\tilde{y}, 3\delta + 4h) \right] + \\ + \sum_{i=1}^{n-1} (-1)^i (n-i) \left\{ f_y(\tilde{y} + i(a+c), \delta) - f_y(i(a+c) - \tilde{y}, \delta) + 2f_y(i(a+c) - \tilde{y}, \delta + 2h) - \right. \\ \left. - 2f_y(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 2h) + f_y(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 4h) - f_y(i(a+c) - \tilde{y}, 3\delta + 4h) + f_y(i(a+c) - \tilde{y}, 3\delta + 4h) - f_y(i(a+c) + \tilde{y}, 3\delta + 4h) \right\}.$$

Влияние ФШ обуславливает увеличение  $f_z$  и  $f_y$ , которое может достигать полуторного значения при определенных размерах сечения ФШ без учета ее массы ( $m_{\text{ФШ}}$ ). Минимальная величина массы ФШ (для обеспечения требуемого силового взаимодействия) составляет, примерно, 25 % массы всех ПМ.

При увеличении высоты  $h$  сечения ФШ эффект от ее применения снижается, поэтому возникает вопрос об отыскании оптимального значения этого размера. В этом случае можно воспользоваться следующим критериальным условием:

$$\frac{f_{z,\text{ФШ}}}{f_z} > k \frac{m_{\text{ФШ}} + m_{\text{М}}}{m_{\text{М}}}, \quad (2)$$

где  $f_{z,\text{ФШ}}$  и  $f_z$  – силы подвеса с ФШ и без нее, и  $m_{\text{М}}$  – масса всех ПМ;  $k$  – коэффициент, усиливающий требования к целесообразности применения

ФШ ( $k > 1$ ). Учитывая связь  $m_{\text{ФШ}}$  с характеристиками и размерами ПМ, (2) можно придать вид:

$$\frac{f_{z,\text{ФШ}}}{f_z} > k \frac{\frac{\mu_0 \cdot J \cdot \rho_{\text{ФШ}}}{2\pi \cdot B_{\text{нас}}} \cdot \left(a + \frac{c}{2}\right) \left(\pi a + 2 \arctg \frac{a}{h} - h \ln \frac{a^2 + h^2}{h^2}\right) + \rho_M \cdot a \cdot h}{\rho_M \cdot a \cdot h},$$

где  $\rho_{\text{ФШ}}$ ,  $\rho_M$  – плотности материалов ФШ и ПМ соответственно,  $B_{\text{нас}}$  – индукция насыщения материала ФШ.

Для рассматриваемого критерия можно использовать и иное соотношение:

$$\frac{f_{z,\text{ФШ}} - m_M g - m_{\text{ФШ}} g}{f_z - m_M g} > 1.$$

Анализ характеристик ПМ затруднен из-за громоздкости выражений для  $f_x$  и  $f_y$ , причем трудоемкость расчетов возрастает по мере увеличения пар магнитных полос. Чтобы в какой-то мере избежать этого, можно использовать схемы замещения, тогда указанные силы можно определить так:

$$f_{z,n} = k_n \cdot f_z \quad \text{и} \quad f_{z,n\text{ФШ}} = k_{n,\text{ФШ}} \cdot f_z,$$

где  $k_n$  и  $k_{n,\text{ФШ}}$  – коэффициенты замещения, определяемые для каждой пары значений  $a$  и  $h$ . Такое замещение приводит к появлению погрешности при определении сил подвеса, не превышающей 8 % в широком интервале изменения высоты подвеса.

Следует констатировать, что при пространственных перемещениях экипажа с помощью схем замещения нельзя значительно понизить сложность анализа силового взаимодействия в рассматриваемой системе подвеса.

Для двух произвольно ориентированных в пространстве ПМ потенциальная энергия равна:

$$E = \mu_0 I \int_0^b dx \int_{y + \left(x - \frac{b}{2}\right)\gamma}^{\left[y + a + \left(x - \frac{b}{2}\right)\gamma\right]} dy \int_{\delta + \left(x - \frac{b}{2}\right)\varphi - \left(y - \frac{a}{2}\right)\alpha}^{\delta + \left(x - \frac{b}{2}\right)\varphi - \left(y - \frac{a}{2}\right)\alpha} H_z dz,$$

где  $\gamma$ ,  $\varphi$  и  $\alpha$  – угловые перемещения ПМ вокруг вертикальной, горизонтальной поперечной и продольной осей соответственно. Производная  $E$  по любой из обобщенных координат дает соответствующую обобщенную силу.

Сила подвеса равна  $F_z = \int_0^b f_z dx$ , здесь аргумент  $f_z$  (под  $f_z$  понимается сила подвеса одной магнитной полосы многорядной системы) содержит величину  $S = \delta + \left(x - \frac{b}{2}\right)\varphi$ . Из-за громоздкости выражения для  $f_z$ , особенно при использовании ФШ, данное выражение целесообразно представить следующим образом  $F_z = b \int_{-1}^1 f_z(\xi) d\xi$ , где  $\xi = \frac{2x}{b} - 1$ . Затем при решении используются квадратурные формулы Чебышева, т. к. весовые коэффициенты в них одинаковы, а узлы симметричны относительно середины ПМ. Таким образом, распределенная сила, действующая на экипажный ПМ, заменяется на ряд сил, сосредоточенных в  $\xi_i$  узлах. Чтобы найти  $F_z$ , экипажный ПМ, ориентированный произвольно относительно путевого полотна, разбивается на  $2n$  элементов одинаковой длины  $b/2$ . Далее каждая наклоненная часть относительно плоскости путевого полотна заменяется на магнит длиной  $b/2$ , который располагается горизонтально (экипажный магнит имеет форму «лестницы»). Отсюда подъемная сила равна

$$F_z = \sum_{K=1}^n f_z^{(\pm K)}.$$

При исследованиях силового взаимодействия ПМ, расположенных на путевого полотне экипажа, а также устойчивости подвеса последнего кроме главного вектора сил необходимо знать главный момент, действующий на экипаж. В случае пяти узлов в квадратурной формуле Чебышева он определяется следующим выражением:

$$M_y = (F_{z1} - F_{z5}) \frac{b}{2} |\xi_1| + (F_{z2} - F_{z4}) \frac{b}{2} |\xi_2|.$$

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПУТЕВОГО ПОЛОТНА И ЭКИПАЖА

Данный вопрос приобретает особую актуальность в процессе создания и разработки транспортных систем. Здесь побудительной причиной является минимизация затрат ферромагнитного материала при сохранении требуемого значения подъемной силы  $f_z$  и величины рабочего зазора  $\delta$ , что благотворно отражается на стоимости экипажа и путевого полотна.

Оптимизационная задача формулируется в зависимости от условий эксплуатации транспортной системы, ее габаритных размеров, технической возможности осуществления конструкции отдельных узлов и т.д.

За целевые функции могут быть взяты показатели эффективности  $q_1 = f_z / mg$  и устойчивости  $q_2 = f_z / f_y$ . Учитывая, что в реальных магнитных системах боковые перемещения окажут весьма незначительное влияние на силу подвеса, в качестве целевой функции можно рассматривать нелинейную функцию  $q_1 = q_1(\mathbf{x})$ , где  $\mathbf{X} = \{a, h, c\}$ .

Количество компонент  $x_i$  варьируется в зависимости от конкретики задачи. Отыскание  $\max\{q_1(\mathbf{x})\}$  заключается в поиске  $\min\{-|q_1(\mathbf{x})|\}$ , т.е.  $\Phi(\mathbf{x}) = -|q_1(\mathbf{x})|$ . Условия эксплуатации реальных транспортных систем рассматриваемого типа подсказывают численные ограничения, налагаемые на компоненты  $\mathbf{X}$ :

$$0 < a \leq 0,1 \text{ м}, 0 < h \leq 0,1 \text{ м}, c \geq 0.$$

Возможны и другие ограничения, диктуемые конкретикой задачи, например, количество магнитных полос, устанавливаемых на путевом полотне и экипаже, наличие ФШ и др.

В качестве первого шага оптимизации рассматривался самый простой случай - неподвижный экипаж. Тогда выбор оптимизационного метода существенно упрощается, если учесть, что их физическая сущность позволяет заметно сузить границы поиска, кроме того, количество компонент сравнительно невелико. В результате был выбран метод перебора с переменным шагом в окрестности точки  $\mathbf{x}$  минимума  $\Phi(\mathbf{x})$ .  $\Phi(\mathbf{x})$  – выпуклая функция и, следовательно, имеет глобальный минимум.

Были рассмотрены задачи поиска  $\max\{\mu_z(\mathbf{x})\}$  для ряда магнитных систем, например, одна пара взаимодействующих полос без ФШ; пара полос с чередующейся полярностью без ФШ;  $n$  пар полос с чередующейся полярностью с ФШ.

Осуществлялся поиск глобального экстремума  $\mu_z(\mathbf{x})$  и определялись оптимальные значения  $x_{i0}$  при различных  $f_z$ ,  $\delta$  и  $J$ .

Выбор ограничивающего условия обуславливался тем обстоятельством, что величина взаимного размагничивающего действия магнитных полей зависит от величины минимально допустимого рабочего зазора. Это условие имеет вид:

$$\frac{1}{q + \chi_r} + \frac{0,95}{2\pi(1 + \chi_r / q)} \left( \arctg \frac{y}{z} + \arctg \frac{y-a}{z+h} - \arctg \frac{y}{z+h} - \arctg \frac{y-a}{z} \right) \leq \left| \frac{H_{\text{пер}}}{J_r} \right|,$$

где  $\chi_r$  - магнитная восприимчивость материала ПМ,  $z = \delta$ . Результаты решения этого неравенства при  $z = 0$  и  $y = a/2$  приведены на Рис. 8.

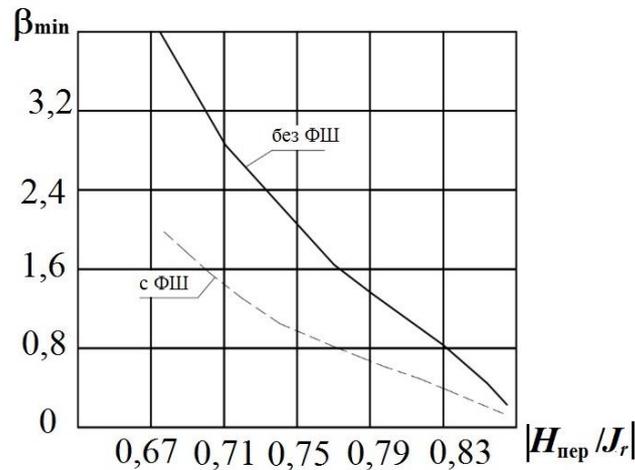


Рис. 8. Зависимость минимально допустимого отношения сторон сечения магнита от  $|H_{\text{пер}} / J_r|$

Здесь по оси ординат отложена величина минимально допустимого отношения сторон сечения магнита  $\beta = \beta_{\text{min}} = h/a$ , удовлетворяющего рассматриваемому неравенству для вариантов с использованием ФШ и без нее. Как видно, важной характеристикой магнитного материала является: отношение  $|H_{\text{пер}} / J_r|$ , с его увеличением роль ограничивающего условия снижается. Наличие ФШ значительно улучшает характеристики подвеса, позволяет получать бóльшие значения  $(a/h)_{\text{max}} = 1/\beta_{\text{min}}$ . Большим значениям  $a/h$  свойственны высокие  $q_1$ , при этом при  $a > h$  экипаж ведет себя устойчивее в горизонтальной плоскости по сравнению со случаем  $h > a$ .

## ВЫВОДЫ

1. Целесообразно использовать многорядные системы из постоянных магнитов, установленные как на экипаже, так и на путевом полотне. Магниты устанавливаются с чередованием полярности.
2. Увеличение количества рядов магнитов с чередующейся полярностью приводит к возрастанию результирующей напряженности размагничивающего поля, а в случае без чередования полярностей наблюдается обратный эффект.
3. Сила подвеса достигает максимума при определенном расстоянии между полосами из постоянных магнитов. Например, сила подвеса при вариациях размеров поперечного сечения ПМ в широких пределах достигает максимума при  $c \approx 0,01$  м.

4. Поперечное смещение экипажных ПМ при горизонтальной схеме расположения приводит к уменьшению силы подвеса (вплоть до изменения ее направления) и возрастанию боковой силы, причем зависимость последней от поперечного смещения имеет максимум.
5. Наличие ферромагнитной шины не только значительно улучшает характеристики подвеса (силы взаимодействия экипажных и путевых ПМ при определенных размерах сечения магнитной полосы возрастают примерно в полтора раза), но и увеличивает устойчивость подвеса.
6. Использование ПМ с большими значениями отношения ширины к высоте магнита приводит не только к увеличению эффективности подвеса, но и к повышению устойчивости в горизонтальной плоскости.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 360 с. [Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverhprovodimosti*. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”; 2007. 360 p. (In Russ.)].
2. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF, editors. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problemi i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.02.2019. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>
3. Bins KJ, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic problems*. Oxford: Pergamon Press; 1963. 376 p.
4. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: ВШ, 1986. – 240 с. [Demirchyan KS, Chechurin VL. *Mashinnye raschety elektromagnitnyh polej*. Moscow: VSh; 1986. 240 p. (In Russ.)].
5. Flankl M, Wellerdieck T, Tüysüz A, Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications*. 2017;12(3):357-364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
6. Chin JC, Gray JS, Jones SM, Berton JJ. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida. doi:10.2514/6.2015-1587
7. Janzen R. Trans Pod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. *Procedia Engineering*. 2017;199:8-17. doi:10.1016/j.proeng.2017.09.142
8. Beach AE. The Pneumatic Tunnel Under Broadway, NY. *Scientific American*. 1870;22(10):154-156. doi:10.1038/scientificamerican03051870-154
9. Oettershagen P. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation. 2016. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500855

10. Evstaf'ev AM, Nikitin VV, Telichenko SA. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:77-81. doi: 10.3103/S1068371220020042
11. Nikitin VV, Sychugov AN, Rolle IA, et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:87-92. doi: 10.3103/S1068371220020078
12. Valinsky OS, Evstaf'ev AM, Nikitin VV. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages. *Russ. Electr. Engin.* 2018;89:566-570. doi: 10.3103/S1068371218100103
13. Nikitin VV, Marikin AN, Tret'yakov AV. Generator cars with hybrid power plants. *Russ. Electr. Engin.* 2016;87:260-265. doi: 10.3103/S1068371216050138
14. Baiko AV, Nikitin VV, Sereda EG. Autonomous power systems with synchronous generators and hydrogen energy sources. *Russ. Electr. Engin.* 2015;86:479-484. doi: 10.3103/S1068371215080027

**Сведения об авторах:**

**Ким Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор;  
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;  
E-mail: kimkk@inbox.ru

**Карпова Ирина Михайловна**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN-код: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753  
E-mail: legiero@mail.ru

**Information about the authors:**

**Konstantin K. Kim** Doctor of Technical Sciences, Professor;  
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;  
E-mail: kimkk@inbox.ru

**Irina M. Karpova** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN-код: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753  
E-mail: legiero@mail.ru

**Цитировать:**

Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 91–106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106

**To cite this article:**

Kim KK, Karpova IM. On the issue of the development of permanent magnet suspension systems for transport systems. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2022;8(4):91-106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106