

## Оценка роли взаимоиндукции между путевыми катушками в системе электродинамического подвеса высокоскоростного поезда

ЗАИКИН С.Н.

*Рассматривается высокоскоростной поезд на электродинамическом подвесе с дискретными путевыми катушками, сверхпроводящей обмоткой возбуждения и нуль-поточной схемой соединения катушек подвеса. Оценивается влияние отдельных коэффициентов взаимной индуктивности в системе путевых катушек на средние силы подъема, поперечной стабилизации, электродинамического сопротивления движению и амплитуды их пульсаций в зависимости от скорости. Проанализировано изменение параметра левитационного качества в зависимости от взаимной индуктивности катушек подвеса при всех значениях скорости движения. Для заданной массы вагона  $m = 20$  тонн получена зависимость балансного вертикального смещения (когда подъемная сила компенсирует вес вагона) от скорости движения. Продемонстрирована зависимость поперечной и вертикальной жесткости системы от скорости. Получена зависимость требуемого поперечного отклонения поезда от радиуса преодолеваемой кривой.*

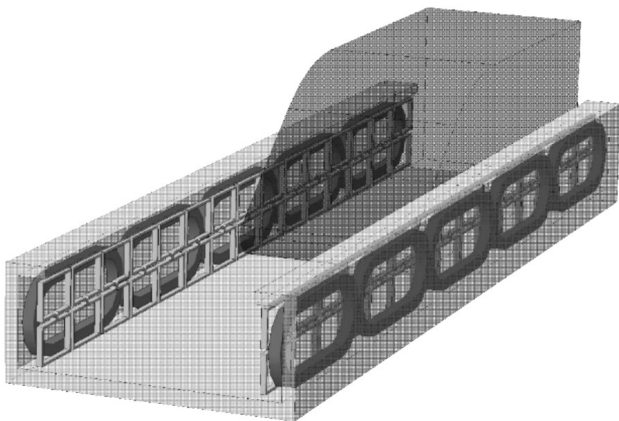
*К л ю ч е в ы е с л о в а:* высокоскоростной наземный транспорт, магнитный электродинамический подвес, маглев, линейный синхронный двигатель

Рассмотрим один из вариантов электродинамической системы подвеса, когда в качестве пути используется U-образный канал (рис. 1), внутри которого движется поезд. Статорные обмотки: тяговая (отвечающая за разгон и торможение) и левитационная (совмещающая функции подвеса и боковой стабилизации) расположены в стенках пути, а индукторы, которыми являются сверхпроводящие кольца, — по бокам подвижного состава [1, 2].

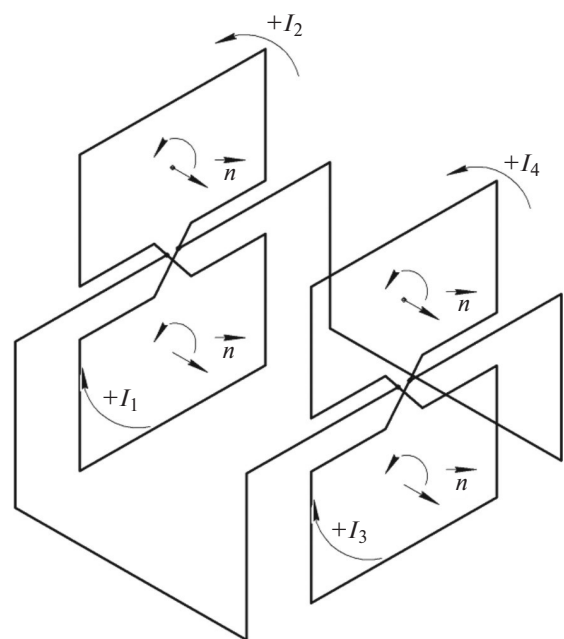
Подъем поезда над поверхностью осуществляется не с начала движения, а в процессе разгона, поэтому на низких скоростях в качестве опоры используются специальные колеса. Для вертикальной и поперечной стабилизации не требуется каких-либо систем автоматического регулирования, так как

сама конструкция обеспечивает положение устойчивого равновесия при движении состава. Такая система используется в японских поездах JR—Maglev.

Катушки верхнего и нижнего рядов системы подвеса соединены встречно, а контуры с противоположных сторон пути — согласно (рис. 2). В этом случае система называется нуль-поточной [1, 3].



**Рис. 1.** Общий вид путевой структуры с тяговыми и левитационными системами



**Рис. 2.** Нуль-поточная схема соединения контуров обмотки подвеса

При разработке математической модели были приняты следующие допущения. Большое расстояние между противоположными сторонами пути позволяет не учитывать их взаимное влияние (конечно, кроме электрических соединений). С учетом того, что на экипаже с противоположных сторон расположены индукторы, магнитное поле которых ориентировано одинаково по отношению к поперечной оси  $Y$ , системы подвеса сравниваются при рассмотрении движения одного индуктора, расположенного на оси пути (центр индуктора расположен на оси  $X$ ), а ширина пути теперь будет равна двум зазорам между индуктором и путевыми катушками. Из-за высокой индуктивности катушки, по виткам которой протекает ток сверхпроводящего магнита, индуктор в качестве допущения будем считать контуром с фиксированным током. Толщина катушек и индуктора не учитывается. Сопротивление поперечных перемычек в нуль-поточной системе равно нулю.

С целью определения индуцированного тока  $i_w$  для каждой из путевых катушек элементарной ячейки, выполненной по системе нулевого потока, можно записать:

$$-L \frac{d}{dt} i_w(t) - \sum_q [n_w n_q M_{wq} \frac{d}{dt} i_q(t)] - i_w(t) R - n_w v_x f_{xw}(t) = U, \quad (1)$$

где  $U$  – разность потенциалов между точками подключения поперечных перемычек, если пренебречь их сопротивлением (рис. 2);  $L$  – индуктивность катушки подвеса;  $M_{wq}$  – взаимная индуктивность между данным и произвольным контурами системы подвеса;  $R$  – сопротивление катушки подвеса;  $i_w$  – ток в данной катушке системы подвеса;  $i_q$  – ток в соседней катушке системы подвеса;  $n_w$  – число витков данной катушки системы подвеса;  $n_q$  – число витков произвольной катушки системы подвеса;  $f_{xw}(t)$  – функция, численно равная силе взаимодействия между контурами при единичном токе в стационарном контуре.

При расчете будем учитывать связь ближайших соседних путевых катушек через взаимную индукцию, как показано рис. 3.

На рис. 3 углошпенной линией показан контур, для которого составляется уравнение по второму закону Кирхгофа. Для заданных выше геометрических параметров рассчитана взаимная индуктивность по определению – как потокосцепление катушек, расположенных в соответствующих местах. Получено  $M = -6,557 \cdot 10^{-8} n^2$  Гн,  $M_1 = -2,846 \cdot 10^{-8} n^2$  Гн,  $M_2 = -0,994 \cdot 10^{-8} n^2$  Гн,  $n$  – число витков катушек подвеса,  $n$  равное 52.

Для элементарной ячейки подвеса (4 катушки по две с каждой стороны пути), в которую входит выделенная катушка на рис. 2, можно составить

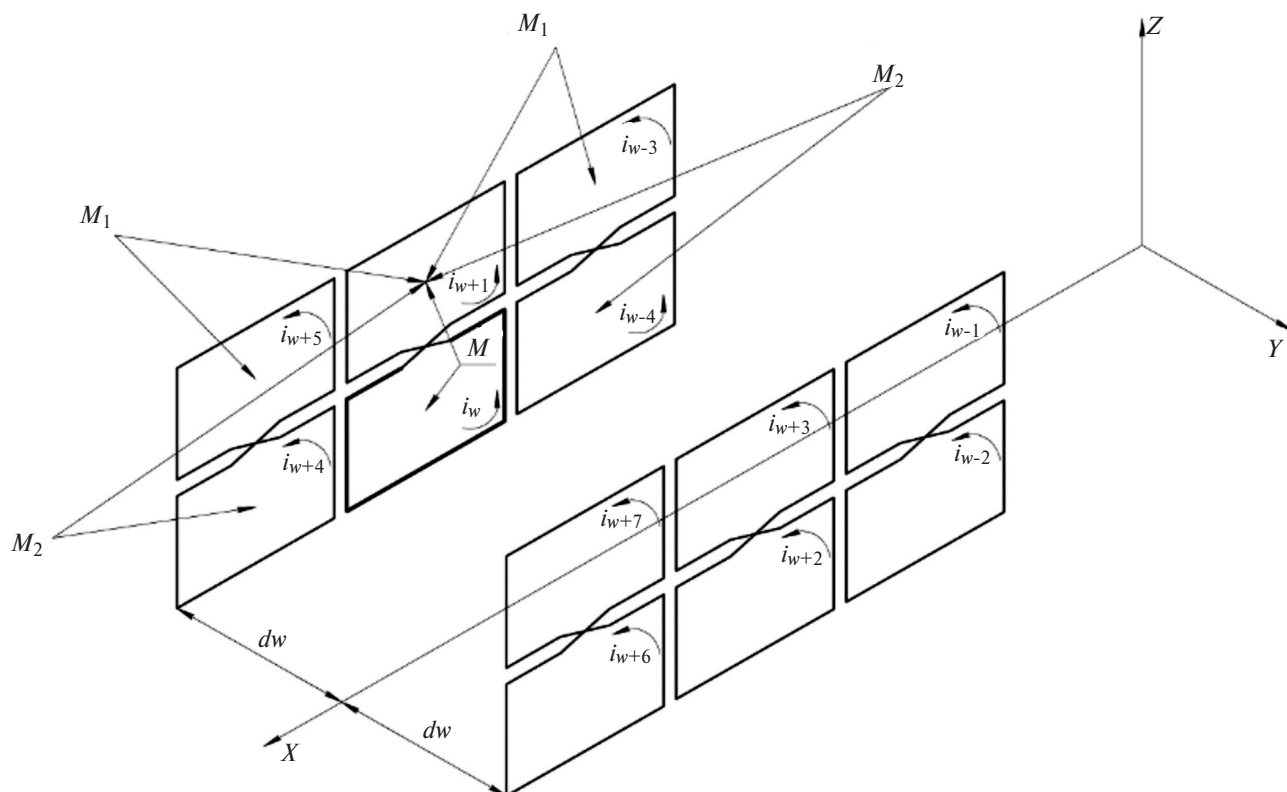


Рис. 3. Схема учета взаимной индуктивности контуров:  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M$  – значения взаимной индуктивности с соседними контурами

следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 & -L \frac{d}{dt} i_w(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w+4}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w-4}(t) - \\
 & -M_2 \frac{d}{dt} i_{w+5}(t) - M_2 \frac{d}{dt} i_{w-3}(t) - M \frac{d}{dt} i_{w+1}(t) - \\
 & -i_w(t)R = U + nvf_{xw}(t); \\
 & -L \frac{d}{dt} i_{w+1}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w+5}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w-3}(t) - \\
 & -M_2 \frac{d}{dt} i_{w+4}(t) - M_2 \frac{d}{dt} i_{w-4}(t) - M \frac{d}{dt} i_w(t) - \\
 & -i_{w+1}(t)R = U + nvf_{xw+1}(t); \\
 & -L \frac{d}{dt} i_{w+2}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w+6}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w-2}(t) - \\
 & -M_2 \frac{d}{dt} i_{w+7}(t) - M_2 \frac{d}{dt} i_{w-1}(t) - M \frac{d}{dt} i_{w+3}(t) - \\
 & -i_{w+2}(t)R = U + nvf_{xw+2}(t); \\
 & -L \frac{d}{dt} i_{w+3}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w+7}(t) - M_1 \frac{d}{dt} i_{w-1}(t) - \\
 & -M_2 \frac{d}{dt} i_{w+6}(t) - M_2 \frac{d}{dt} i_{w-2}(t) - M \frac{d}{dt} i_{w+2}(t) - \\
 & -i_{w+3}(t)R = U + nvf_{xw+3}(t); \\
 & i_w(t) + i_{w+1}(t) + i_{w+2}(t) + i_{w+3}(t) = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & F(t) = \sum_{j=1}^{4N} [i_j(t) f_j(t),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $F(t)$  – действующая на индуктор суммарная сила, складывающаяся из равных и противоположно направленных (согласно третьему закону Ньютона) сил, действующих на путевые контуры (знак минус в (2));  $w$  – номер первого контура в ячейке (для первой ячейки  $w=1$ , для второй  $w=5$  и т.д.).

Магнитную индукцию, создаваемую сверхпроводящим магнитом, т.е. в нашем случае катушкой с фиксированным током, находим, используя закон Био–Савара–Лапласа:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I_0 \oint_{L_0} \frac{[dl \times r']}{r'^3}, \tag{3}$$

где  $I_0$  – МДС индуктора;  $dl$  – элементарный вектор вдоль обхода контура  $L_0$ ;  $r'$  – направлен от элемента  $dl$  к точке наблюдения поля.

Зная силу  $f_j(t)$ , можно вычислить реальную силу, действующую на индуктор со стороны стартовой обмотки  $F(t)$ :

$$f_j(t) = \oint_{L_j} [dl \times B]. \tag{4}$$

Система (2) решается численно в Mathcad при следующих параметрах: длина индуктора  $2c=1,054$  м, высота индуктора  $2d=0,5$  м; воздушный зазор между индукторами и катушками подвеса  $dw=0,2$  м; сопротивление и индуктивность катушки подвеса  $R=33,9 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $L=10^{-3}$  Гн; ток индукторов  $I_0=7 \cdot 10^5$  А, длина катушки подвеса  $2a=0,35$  м; высота катушки подвеса  $b=0,34$  м; число витков верхней и нижней катушек подвеса  $n_w=52$ ;  $n_q=52$ ; вертикальное смещение индукторов  $Z=-0,03$  м; боковое смещение индукторов  $Y=-0,005$  м; продольный шаг путевой обмотки  $H=0,45$  м.

В результате получены силы, действующие на тележку с восемью индукторами (по 4 с каждой стороны), расположенными с шагом 1,35 м с переменной полярностью. Параметры взяты близкими к используемым на реальном поезде MLX01 японской компании JR-Maglev.

В [1, 4] вводится понятие «критерий левитационного качества» как отношение подъемной силы к силе электродинамического торможения:

$$\gamma = \frac{F_z}{|F_x|}. \tag{5}$$

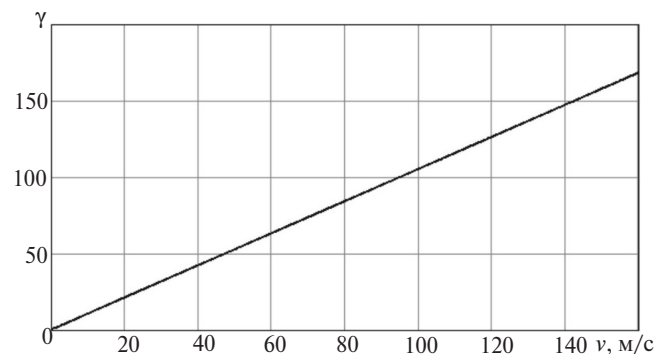


Рис. 4. Зависимость левитационного качества системы от скорости

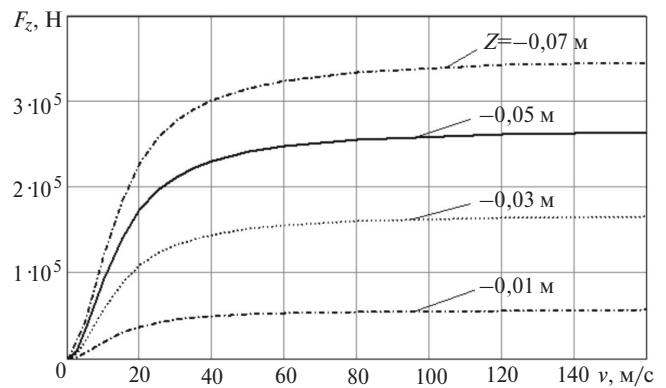


Рис. 5. Зависимость подъемной силы от скорости при разном вертикальном смещении центра индукторов относительно середины расстояния между верхней и нижней катушками подвеса

Отношение подъемной силы к расходуемой мощности ( $F_x v$ ) практически не зависит от скорости и в диапазоне скоростей 20–160 м/с остается на уровне 1,05 Н/Вт.

Рассмотрим зависимость подъемной силы от скорости (рис. 5). При большем вертикальном смещении взлетная скорость снижается, но при этом падает параметр левитационного качества системы. При смещении  $-0,05$  м скорость взлета для вагона массой 20 т будет составлять 25 м/с (90 км/ч).

Зависимость боковой и подъемной сил от смещения (при рабочих значениях) практически линейна, что позволяет рассчитать коэффициенты поперечной и вертикальной жесткости системы для любой скорости (рис. 6); их значения близки.

Для заданной массы вагона  $m=20$  т получена зависимость балансного вертикального смещения (когда подъемная сила компенсирует вес вагона) от скорости движения (рис. 7). Видно, что с ростом скорости вертикальное смещение снижается, что соответствует росту воздушного зазора под вагоном, затем кривая выходит на «насыщение» и балансное смещение с дальнейшим ростом скорости меняется слабо.

Кривая зависимости параметра левитационного качества (рис. 8) от скорости при балансном вертикальном смещении имеет линейный характер.

Получена зависимость (рис. 9) требуемого поперечного отклонения поезда от радиуса преодолеваемой кривой для скорости 160 м/с. Так, при движении по кривой радиусом 5000 м ( $m=20$  т) для компенсации возникающей центробежной силы потребуется поперечное смещение около 0,015 м.

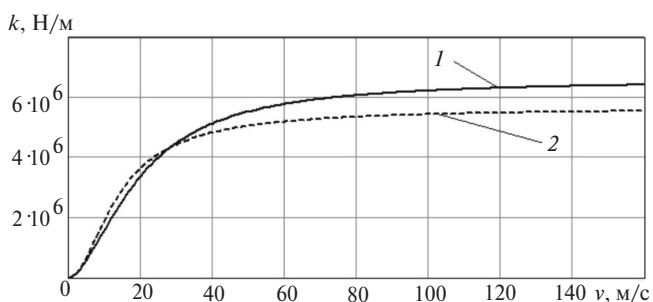


Рис. 6. Зависимость жесткости системы от скорости: 1 — поперечная жесткость; 2 — вертикальная жесткость

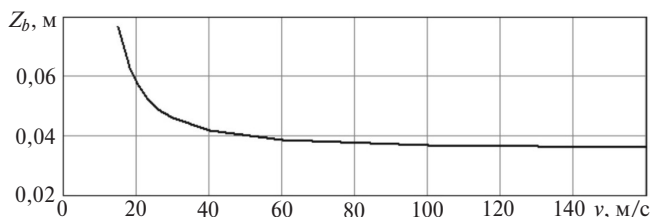


Рис. 7. Зависимость балансного вертикального смещения от скорости

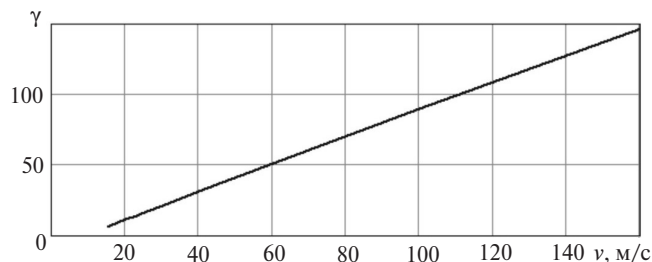


Рис. 8. Зависимость параметра качества при балансном смещении от скорости

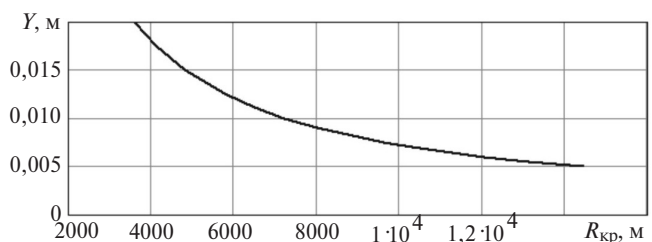


Рис. 9. Зависимость поперечного смещения вагона от радиуса кривой

Необходимое поперечное смещение связано обратнопропорциональной зависимостью с радиусом проходимой кривой с коэффициентом 72 для заданных параметров.

Рассчитаем средние значения сил в зависимости от скорости с учетом взаимной индукции и без (рис. 10–12). При отсутствии смещения в вертикальном направлении подъемная сила не возникает, аналогично при отсутствии бокового смещения поперечная сила равна нулю, поэтому для получения зависимостей сил от скорости примем смещения в вертикальном и поперечном направлении равными  $Z=-0,03$  м,  $Y=-0,005$  м.

Одна из особенностей систем движения на электродинамическом подвесе — специфическая форма зависимости среднего значения силы электродинамического сопротивления от скорости: резкий рост в области малых скоростей, пик в районе 10–12 м/с и плавное снижение силы. При крейсерской скорости 160 м/с сила электродинамического

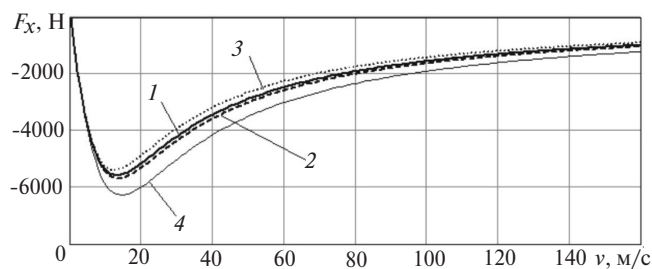


Рис. 10. Зависимость среднего значения силы электродинамического торможения от скорости: 1 — с учетом всех трех коэффициентов взаимной индуктивности ( $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ); 2 — без учета диагональной компоненты взаимной индуктивности ( $M_2$ ); 3 — без учета диагональной ( $M_2$ ) и горизонтальной ( $M_1$ ) составляющих взаимной индуктивности; 4 — без учета взаимной индуктивности

сопротивления значительно меньше, чем при низких скоростях движения. Такой характер зависимости оказывает влияние на устойчивость линейного синхронного двигателя [5–6]. При учете указанных коэффициентов взаимной индукции при скорости 160 м/с среднее значение силы электродинамического сопротивления снижается на 18,6%. В общем токе в катушках подвеса можно выделить составляющую, связанную с поперечным отклонением вагона, которая протекает соответственно по поперечным перемычкам. Так как для составляющей тока, не связанной с поперечными перемычками, общая индуктивность катушек увеличивается с введением взаимной индуктивности, что ведет к ее снижению, то сила электродинамического сопротивления, определяемая данной составляющей тока, снижается.

Из рис. 11 видно, что на низких скоростях движение недостаточно устойчиво в поперечном направлении, что заставляет применять боковые колеса, чтобы избавиться от этого недостатка. При учете взаимной индукции на скорости 160 м/с среднее значение поперечной силы повышается на 29,5%. Это связано с тем, что основной вклад дает учет коэффициента взаимной индукции между соседними верхней и нижней катушками ( $M$ ), а поскольку ток, вызванный поперечным смещением экипажа, в верхней и нижней катушках имеет одинаковое направление, а знак  $M$  отрицательный, то в итоге несколько снижается общее индуктивное сопротивление катушек, что вызывает увеличение значения тока в них и соответственно поперечной силы.

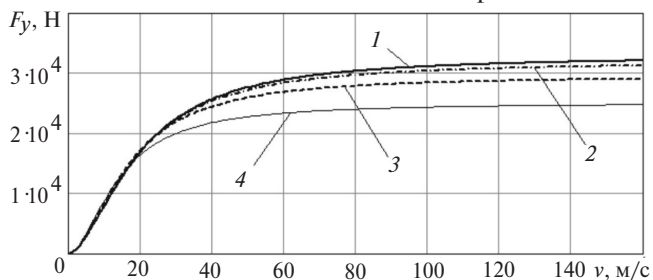


Рис. 11. Зависимость среднего значения силы в поперечном направлении от скорости: 1 – с учетом  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ; 2 – без учета  $M_2$ ; 3 – без учета  $M_2$  и  $M_1$ ; 4 – без учета взаимной индуктивности

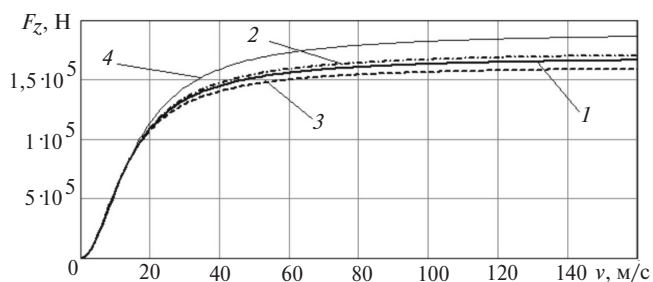


Рис. 12. Зависимость среднего значения подъемной силы от скорости: 1 – расчет с учетом  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ; 2 – без учета  $M_2$ ; 3 – без учета  $M_2$  и  $M_1$ ; 4 – без учета взаимной индуктивности

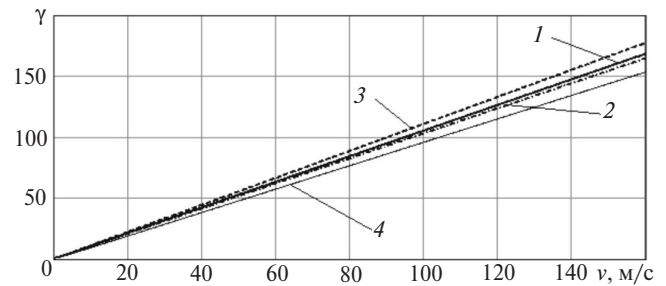


Рис. 13. Зависимость параметра левитационного качества от скорости: 1 – с учетом  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ; 2 – без учета  $M_2$ ; 3 – без учета  $M_2$  и  $M_1$ ; 4 – без учета взаимной индуктивности

Рассмотрим влияние взаимной индуктивности на зависимость подъемной силы от скорости (рис. 12).

При учете взаимной индукции среднее значение подъемной силы снижается на 10,8% (при скорости 160 м/с). Суммарный ток, протекающий в ячейке, состоящей из четырех катушек, можно разделить на составляющие вертикального и поперечного смещения и отдельно оценивать силовые эффекты, ими вызываемые. Составляющая тока при вертикальном смещении отвечает за подъемную силу и замыкается по «восьмерке», при этом направление протекания тока в одной катушке будет положительным, в другой отрицательным (при условии, что положительные направления обхода катушек выбраны единообразно). Добавление взаимной индуктивности между верхней и нижней катушками срабатывает на уменьшение этой составляющей тока, что снижает подъемную силу.

Учет взаимной индуктивности повышает параметр качества при всех скоростях движения, так как при введении  $M$  сила электродинамического сопротивления снижается больше, чем подъемная сила.

Рассмотрим зависимость амплитуды пульсаций сил от скорости (рис. 14–16).

При учете указанных коэффициентов взаимной индукции на скорости 160 м/с пульсации силы электродинамического сопротивления снижаются на 11,3%, пульсации поперечной силы увеличива-

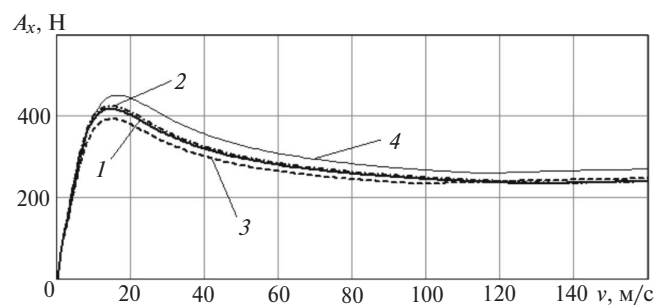


Рис. 14. Амплитуда пульсаций силы электродинамического сопротивления в зависимости от скорости: 1 – с учетом  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ; 2 – без учета  $M_2$ ; 3 – без учета  $M_2$  и  $M_1$ ; 4 – без учета взаимной индуктивности

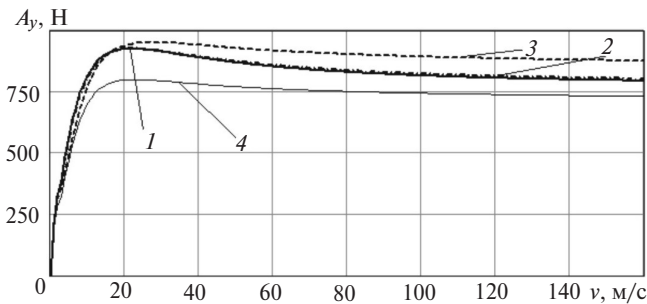


Рис. 15. Амплитуда пульсаций поперечной силы в зависимости от скорости: 1 – с учетом  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ; 2 – без учета  $M_2$ ; 3 – без учета  $M_2$  и  $M_1$ ; 4 – без учета взаимной индуктивности

ются на 8,5%, пульсации подъемной силы снижаются на 18,1%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзензерский В.А., Омеляненко В.И. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. Киев: Наукова думка, 2001, 479 с.
2. Railway Technical Research Institute [Электрон. ресурс] URL: <http://www.rtri.or.jp/eng/> (дата обращения 12.12.2019).
3. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007, 360 с.

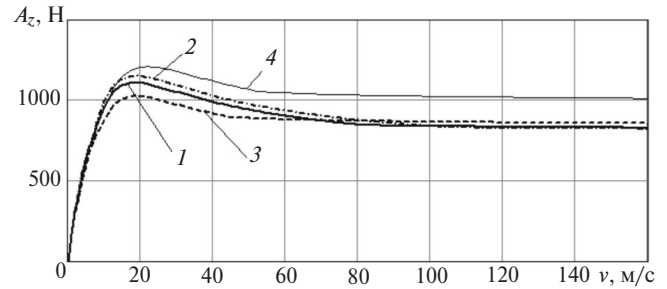


Рис. 16. Амплитуда пульсаций подъемной силы в зависимости от скорости: 1 – с учетом  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ; 2 – без учета  $M_2$ ; 3 – без учета  $M_2$  и  $M_1$ ; 4 – без учета взаимной индуктивности

4. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А. Транспорт с магнитным подвесом/Под общ. ред. В.И. Бочарова, В.Д. Нагорского. М.: Машиностроение, 1991, 316 с.

5. Заикин С.Н., Соколов О.Б. Математическое моделирование стационарных режимов работы линейного синхронного двигателя для поезда с электродинамическим подвесом. — Транспорт Урала, 2014, № 4 (43), с. 76–82.

6. Заикин С.Н., Соколов О.Б. Исследование устойчивости стационарного режима работы линейного синхронного электропривода вагона на электродинамическом подвесе. — Транспорт Урала, 2015, № 2 (45), с. 71–79.

[30.12.2019]

А в т о р: Заикин Сергей Николаевич — инженер I категории Дирекции ОАО «РДЖ», Екатеринбург.

Electrichestvo, 2020, No. 6, pp. 55–60

DOI:10.24160/0013-5380-2020-6-55-60

## Evaluating the Role of Mutual Induction between the Track Coils in a High-Speed Train's Electrodynamic Suspension System

ZAIKIN Sergey N. (Traction control of JSC «Russian Railways», Ekaterinburg, Russia) — Ist category Engineer

A high-speed train with an electrodynamic suspension with discrete track coils, a superconducting excitation winding and a null-flux connection scheme of the suspension coils is considered. The influence of the individual coefficients of mutual inductance in the system of track coils on the average lift forces, lateral stabilization, electrodynamic resistance to motion and the amplitude of their pulsations as a function of speed is estimated. The change in the levitation quality parameter is analyzed depending on the mutual inductance of the suspension coils at all speeds of motion. For a given car mass  $m = 20$  tons, the balance vertical offset (when the lift force compensates the car's weight) is obtained from the speed of movement. The dependence of the lateral and vertical stiffness of the system on speed is demonstrated. The dependence of the required lateral deviation of the train on the radius of the curve to be overcome is obtained.

**Key words:** high-speed ground transportation, magnetic electrodynamic suspension, maglev, linear synchronous motor

#### REFERENCES

1. Dzenzerskiy V.A., Omel'yanenko V.I. *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiyey* (High-speed magnetic transport with electrodynamic levitation). Kiev: Naukova Dumka, 2001, 479 p.
2. Railway Technical Research Institute [Electron. Resource] URL: <http://www.rtri.or.jp/eng/> (Data of apple 12.12.2019).
3. Kim K.K. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniyem 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.

4. Bakhvalov Yu.A., Bocharov V.I., Vinokurov V.A. *Transport s magnitnym podvesom/ Pod obshch. red. V.I. Bocharova, V.D. Nagorskogo* (Transport with magnetic suspension/ Under the total. ed. Bocharov, V.D. Nagorsky). M.: Mashinostroyeniye, 1991, 316 p.

5. Zaikin S.N., Sokolov O.B. *Transport Urala — in Russ. (Ural Transport)*, 2014, No. 4 (43), pp. 76 — 82.

6. Zaikin S.N., Sokolov O.B. *Transport Urala — in Russ. (Ural Transport)*, 2015, № 2 (45), pp. 71–79.

[30.12.2019]