

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОСТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛЕВИТАЦИИ

На основі енергетичної моделі для дослідження процесів самостабілізації в системах електродинамічної левітації вивчений вплив розділення магнітного потоку в бортовому магніті та електричного демпфера жорстко пов'язаного з магнітом на рівень залишкової енергії коливань. Показано, що розглянута система магнітного підвісу ефективно гасить вертикальні коливання без використання додаткових демпфуючих пристроїв.

На основе энергетической модели для исследования процессов самостабилизации в системах электродинамической левитации изучено влияние разделения магнитного потока в бортовом магните и электрического демпфера, жестко связанного с магнитом, на уровень остаточной энергии колебаний. Показано, что рассмотренная система магнитного подвеса эффективно гасит вертикальные колебания без использования дополнительных демпфирующих устройств.

Based on the energy model for researching the processes of self-stabilization of the electrodynamic levitation systems, the authors studied the impact of the magnetic flux separation in the on-board magnet, as well as in the electrical buffer, rigidly bound to the magnet, and its effects on the residual oscillation energy level. It was demonstrated that the examined magnetic levitation system could effectively reduce the vertical oscillation without the use of any additional damping devices.

Известно, что в системах электродинамической левитации возникает неустойчивость движения, которая неустранима при использовании в качестве путевой структуры, как сплошного токопроводящего полотна, так и короткозамкнутых дискретных токовых контуров.

Считается, что неустойчивость вертикальных колебаний в системах электродинамической левитации с дискретной путевой структурой не может быть подавлена без использования дополнительных механических демпфирующих устройств, которые не только увеличивают массу системы, но и существенно усложняют ее конструкцию.

Авторами данной работы ранее было показано [1], что система электродинамической левитации может самостабилизироваться без использования механических демпферов, которые обычно жестко связаны с бортовым магнитом.

В данной работе проводится исследование влияния применения электрического демпфера, а также разделения магнитного потока в бортовом магните на процесс самостабилизации вертикальных колебаний в системах электродинамической левитации.

На основе энергетического подхода, используя общепринятые методы моделирования физических процессов, авторы рассматривают электродинамическую левитацию с дискретной путевой структурой.

Физическая модель, используемая для исследования устойчивости движения такой системы, основана на учете эффектов диссипации энергии, генерируемой в виде вихревых токов в путевых контурах магнитным полем бортовых катушек. Подробное изложение модели приведено в работах [1, 2].

Данная модель строится таким образом, чтобы стало возможным выделение из общего процесса движения только вертикальной колебательной компоненты. Это позволяет изучить отдельно переходные индуктивные процессы в системе, противодействующие изменению магнитного потока от бортовых источников.

Выводы относительно возможностей самостабилизации такой системы подвеса могут быть сделаны на основании сопоставления механической и тепловой энергий, полученных расчетным путем.

В работе [3] исследовалась принципиальная возможность изменения частотных и амплитудных характеристик в системах электродинамической левитации за счет числа короткозамкнутых сверхпроводящих контуров без применения вторичного демпфирования.

Ниже исследуется влияние разделения магнитного потока в движущемся экипаже на энергию самостабилизации системы.

Для исследования влияния разделения магнитного потока в бортовом магните на процесс

самостабилизации сверхпроводящий магнит с током I_0 моделируется двумя соосно связанными токовыми рамками с постоянными токами I_{01} и I_{02} ($I_{01} + I_{02} = I_0$), расположенными на расстоянии d друг от друга (рис. 1).

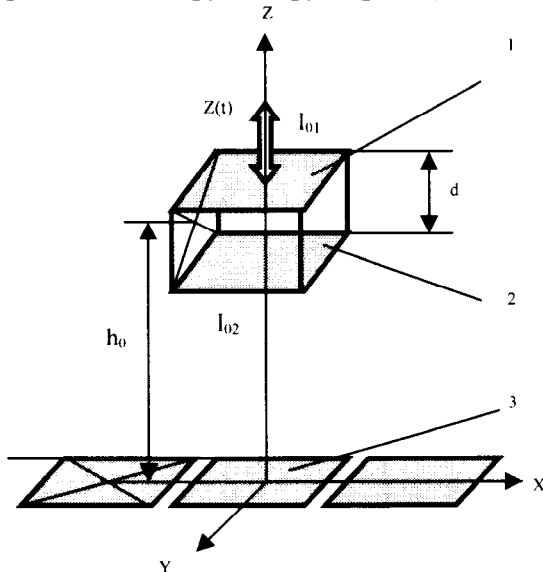


Рис. 1. Физическая модель экипажа:
1, 2 – сверхпроводящие контуры;
3 – короткозамкнутые контуры

Математическая постановка для исследования рассматриваемой задачи строится следующим образом.

На первом этапе решения задачи рассчитывается траектория вертикальных колебаний магнита, движущегося с заданной продольной скоростью V над дискретной путевой структурой. Короткозамкнутые путевые контуры установлены независимо друг от друга. Расстояние d между ними задано.

При решении поставленной задачи были использованы следующие допущения. Движущийся магнит представлен прямоугольной токовой рамкой длиной l_0 , шириной b_0 с некоторым фиксированным током I_0 ; при расчете коэффициентов самоиндукции в путевых контурах сечения проводников считались бесконечно малыми; явление поверхностного эффекта не учитывалось. Влияние путевых дискретных контуров друг на друга также не учитывалось.

Уравнения, описывающие вертикальные колебания движущейся токовой рамки в системе электродинамической левитации, имеют вид

$$m\ddot{z} = -mg + F_z, \quad (1)$$

где m – масса рамки;

z – вертикальная координата её центра масс;

g – ускорение силы тяжести;

F_z – сила взаимодействия рамки с вихревыми токами, наводимыми в дискретной путевой структуре при движении;

I_i – токи, наводимые в контурах путевой структуры;

M_{oi} – коэффициенты взаимоиндукции бортовой рамки и путевых контуров.

Сила взаимодействия F_z в случае разделения магнитного потока в бортовом магните имеет вид [4].

$$F_z = I_{01} \sum_{i=1}^N I_i \frac{\partial M_{01i}(Vt - x_i, z - d/2)}{\partial z} + I_{02} \sum_{i=1}^N I_i \frac{\partial M_{02i}(Vt - x_i, z + d/2)}{\partial z}.$$

Для переходных процессов в короткозамкнутых контурах справедливы уравнения:

$$L_k \frac{dI_k}{dt} + \sum_{i=1}^N I_i \frac{dM_{ik}}{dt} + R_k I_k =$$

$$= - \left(I_{01} \frac{dM_{01k}}{dt} + I_{02} \frac{dM_{02k}}{dt} \right)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

где L_k, R_k – собственная индуктивность и сопротивление путевого токового контура;

M_{ik} – коэффициенты взаимоиндукции;

N – число контуров дискретной путевой структуры.

В соотношение (2) входит изменение коэффициента взаимоиндуктивности в зависимости от времени, которое определяется по формуле

$$\frac{dM_{ik}}{dt} = \frac{\partial M_{ik}}{\partial x} V + \frac{\partial M_{ik}}{\partial z} \frac{dz}{dt}.$$

Для соосно ориентированных контуров путевой структуры и движущейся бортовой магнита, имеющих одинаковую ширину выражения для коэффициентов взаимоиндукции имеют вид [5].

Нетрудно видеть, что уравнения (1) и (2) являются связанными только через коэффициенты взаимной индуктивности $M(Vt - x, z)$.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (1), (2) дополняется начальными условиями, которые задавались в виде:

$$z \Big|_{t=0} = h_0 + \Delta z_0, \dot{z} \Big|_{t=0} = \dot{z}_0 = 0, I_k \Big|_{t=0} = 0,$$

где Δz_0 - начальное вертикальное возмущение.

На втором этапе решения поставленной задачи определялась энергия рассеивания в путевом стационарном контуре, моделирующем дискретную путевую структуру, по формуле

$$E_r = \int_0^t R I_r^2 dt. \quad (3)$$

Для нахождения тока I_r , наводимого в путевом контуре, было проведено интегрирование дифференциального уравнения

$$L_r \frac{dI_r}{dt} + R_r I_r = - \left(I_{o1} \frac{dM_{o1r}}{dt} + I_{o2} \frac{dM_{o2r}}{dt} \right)$$

при начальном условии $I_r(0) = 0$.

Связь первого и второго этапа решения задачи осуществлялась посредством коэффициента взаимной индуктивности M_{or} между движущейся рамкой и контуром, моделирующим путевую структуру. То есть в выражение для определения величины $M_{or}(0, z)$ подставлялось значение амплитуд вертикальных колебаний $z = z(t)$, полученных на первом этапе решения задачи.

Проведенные расчеты для бортового магнита массой 200 кг при $h_0 = 0,15$ м, $I_{o1} = 8000$ А, $I_{o2} = 2000$ А и $V = 60$ м/с показали, что с увеличением расстояния между магнитосвязанными контурами начиная с определенного момента времени, наблюдается значительный рост энергии диссипации бортового магнита. Отметим, что для небольших значений параметра d порядка 0,005...0,015 м это влияние становится незначительным (рис. 2).

Е, Дж

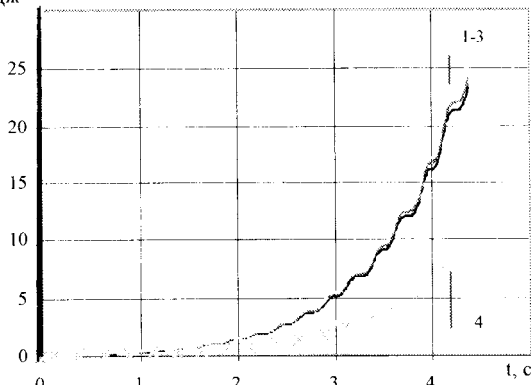


Рис. 2. Изменение энергии в зависимости от времени:

- 1 – энергия рассеивания при $d = 0,005$ м;
- 2 – энергия рассеивания при $d = 0,001$ м;
- 3 – энергия рассеивания при $d = 0,015$ м;
- 4 – энергия колебаний

Отметим, что в расчетах второго этапа длина моделирующего токового коротко замкнутого контура $l_r = 1$ м.

Одним из способов улучшения характеристик систем электродинамической левитации является использование дополнительного электрического демпфирующего устройства, которое жестко соединено с бортовым магнитом.

В рассматриваемой нами модели электрический демпфер моделируется прямоугольным короткозамкнутым токовым контуром с сопротивлением R_d (рис. 3).

Длина и ширина контура равны соответствующим размерам сверхпроводящего магнита.

Масса конструкции сосредоточена посередине расстояния d между сверхпроводящим и короткозамкнутыми контурами.

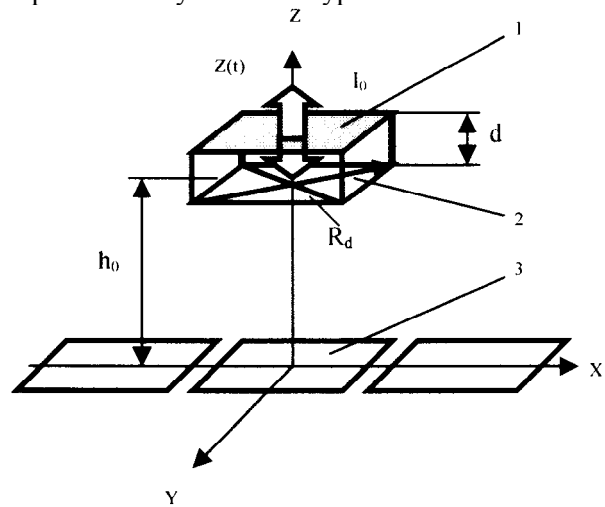


Рис. 3. Физическая модель экипажа:

- 1 – сверхпроводящий контур;
- 2 – электрический демпфер;
- 3 – короткозамкнутые контуры

Уравнение, описывающее вертикальные колебания бортового магнита с жестко закрепленным на нем электрическим демпфером, имеет вид (1).

Здесь сила

$$F_z = I_o \sum_{i=1}^N I_i \frac{\partial M_{oi}(Vt - x_i)}{\partial z}.$$

Переходные процессы в короткозамкнутых контурах описываются уравнением

$$L_k \frac{dI_k}{dt} + \sum_{i=1}^N I_i \frac{dM_{ik}}{dt} + R_k I_k = -I_o \frac{dM_{ok}}{dt}.$$

На втором этапе решения этой задачи определялись энергии рассеивания в путевом стационарном контуре и в электрическом демпфере по формуле (3).

Для нахождения токов, наводимых в путе-

вой структуре I_r и электрическом демпфере I_d , было проведено интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d}{dt}(L_r I_r + M_{or} I_o + M_{dr} I_d) + R_r I_r = 0,$$

$$\frac{d}{dt}(L_d I_d + M_{rd} I_r) + R_d I_d = 0$$

при начальных условиях $I_r(0) = 0$ и $I_d(0) = 0$.

Результаты расчетов энергии диссипации в дискретной путевой структуре и в электрическом демпфере демонстрируют рис.4.

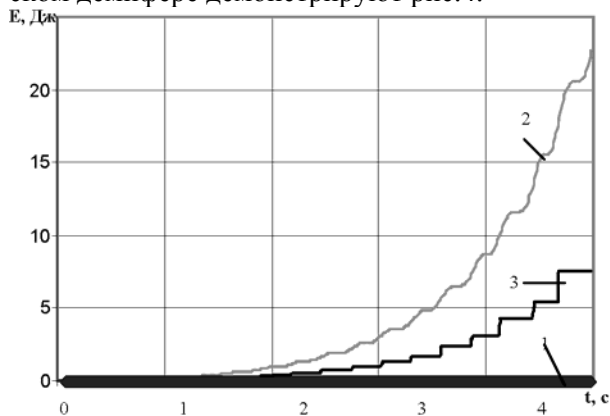


Рис. 4. Изменение энергии в зависимости от времени в системе с демпфером:
 1 – энергия рассеивания при $d = 0,005$ м;
 2 – энергия рассеивания при $d = 0,01$ м;
 3 – энергия рассеивания при $d = 0,015$ м;
 4 – энергия колебаний

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы, что рассеивание энергии в электрическом демпфере существенно меньше, чем в путевой структуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буряк А. А. О возможности самостабилизации движения в системах электродинамической левитации. / А. А. Буряк, В. А. Дзензерский, Э. А. Зельдина, И. И. Финагина // Новини науки Придніпров'я. – 2005. – № 6. – С. 37-42.
2. Буряк А. А. О возможности самостабилизации вертикальных колебаний в системе электродинамической левитации. / А. А. Буряк, В. А. Дзензерский, Э. А. Зельдина // Тезисы доклада 66 международной конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». - Д. -2006. С. 29-30.
3. Горский О. И. Частотные характеристики многоконтурных систем подвешивания / О. И. Горский, В. А. Дзензерский, Э. А. Зельдина // Изв. РАН «Энергетика и транспорт», - 1992. - № 38. - С. 125-129.
4. Дзензерский В. А. О влиянии разделения магнитных потоков на колебания экипажа в системе электродинамической левитации / В. А. Дзензерский, Э. А. Зельдина, И. И. Финагина // Вестник Днепропетр. ун-та ж.д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. - 2006. – Д. – С. 152-154.
5. Kratki N. Ausgleichs organge and schwingungen beimelec namischen magnetkissen system / N. Kratki, K. Oberreti // Archiv fur elecrucecnik BRD. - 1975. - V. 67, № 2. - P. 59-87.

Поступила в редколлегию 29.09.2007.