

В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, А. А. БУРЯК, С. А. ЗЕЛЬДИНА (Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

О ВОЗМОЖНОСТИ САМОСТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛЕВИТАЦИИ

Запропоновано енергетичну модель для дослідження можливості процесів самостабілізації в системах електродинамічної левітації. На основі загальноприйнятих математичних припущень досліджений ефект самостабілізації вертикальних коливань бортового магніту. Показано, що залежність залишкової енергії від маси магніту дає можливість мінімізувати цю енергію конструктивними прийомами. Одержані результати становлять практичний інтерес.

Предложена энергетическая модель для исследования возможности процессов самостабилизации в системах электродинамической левитации. На основе общепринятых математических допущений рассмотрен эффект самостабилизации вертикальных колебаний бортового магнита. Показано, что зависимость остаточной энергии от массы магнита дает возможность минимизировать эту энергию конструктивными приемами. Полученные результаты имеют практический интерес.

An energy-modeling technique for studying theoretical possibilities of stabilization of electrodynamic levitation systems has been presented. Based on the generally accepted mathematical assumptions, the effect of self-stabilization of vertical oscillations of the on-board magnet has been examined. The authors have demonstrated that dependence of the residual energy on the weight of the magnet allows minimizing the energy with the use of constructive methods. The derived results are of a practical significance.

Как известно [1; 2], неустойчивость левитирующего бортового магнита проявляется в виде небольшого инкремента при использовании дискретной путевой структуры, состоящей из короткозамкнутых токовых контуров. Авторы многочисленных исследований утверждают, что неустойчивость вертикальных колебаний в системах электродинамической левитации не может быть устранена без использования дополнительных механических демпфирующих устройств. Однако применение механических демпферов [3] увеличивает массу системы, усложняет ее конструкцию и приводит к дополнительным энергетическим затратам.

В работе [4] было продемонстрировано, что изменить частотные и амплитудные характеристики вертикальных колебаний можно за счет увеличения числа токовых контуров без применения механического демпфирования.

Целью данной работы является исследование возможности процесса самостабилизации вертикальных колебаний экипажа высокоскоростного наземного транспорта без применения или с минимальным применением дополнительных механических демпфирующих устройств.

При исследовании устойчивости транспортного экипажа авторами были использованы энергетический подход и модель одноточечного электродинамического подвеса.

Магнитолевитирующий объект, в принципе, должен точно двигаться по заданной траектории. Действие же случайных или регулярных сторонних сил, направленных под углом к вектору скорости, превращает перемещение объекта в сложное движение с колебательной компонентой по той координате, по которой произошло возмущение. Гашение поперечных движению колебаний представляет сложную проблему, так как свободно подвешенный объект не имеет механического контакта с полотном дороги. Если путевая структура дискретна, то подъемная сила имеет пульсирующий характер. Циклическое действие такой силы может создавать колебательную динамику с инкрементом, что при развитии процесса приведет к потере устойчивости левитирующего движения.

Физическая модель для исследования устойчивости движения такой системы основана на учете и использовании эффектов диссипации энергии, генерируемой в виде вихревых токов в путевых контурах магнитным полем движущегося бортового магнита. Вихревые токи в путевой структуре наводятся при любых типах движения магнита относительно полотна, то есть при любых изменениях плотности магнитного потока, пересекающего плоскости путевых дискретных контуров. Энергия вихревых токов рассеивается на сопротивлении материала путевых контуров и превращается в тепло-

вую. Вертикальные колебания магнита добавляют переменную компоненту изменений магнитного потока. Это движение сопровождается теми же эффектами диссипации, что и линейное перемещение.

Физическая модель транспортного экипажа (рис. 1) имеет следующую структуру:

- отображает одноточечный силовой узел электродинамического подвеса;
- позволяет выделение вертикальной колебательной компоненты из общего сложного движения магнита;
- отображает бинарную структуру экипажа (ходовую и бортовую части).

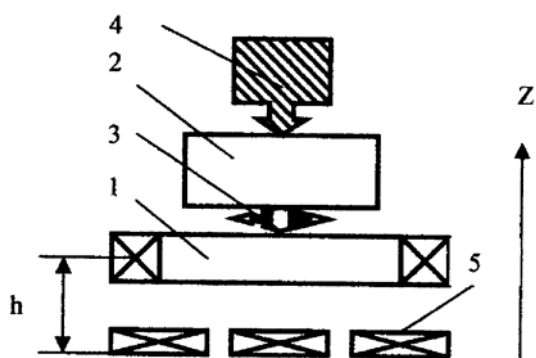


Рис. 1. Физическая модель экипажа

В данной модели продольное движение экипажа на высоте h с фиксированной скоростью V выводится из рассмотрения.

Экипаж состоит из ходовой части, отображенной магнитом 1, и бортовой части 2, соединенных рессорой 3. Он удерживается при $V = 0$ виртуальным силовым устройством 4 на расстоянии h от трех короткозамкнутых путевых контуров 5, которые покрываются проекцией магнита 1. Силовое устройство 4 может сообщать магниту 1 периодические смещения из положения $z(0) = h$, характеризующие колебательное движение по траектории, представленной зависимостью $z = z(t)$.

Таким образом, данная модель имитирует только колебательную компоненту сложного возмущенного по z движения магнита 1. Имея расчетное выражение для реальной траектории колебаний бортового магнита $z = z(t)$, и фиксированное размещение элементов системы, можно получить численные характеристики токов, индуцированных этими колебаниями в путевых контурах.

Выделение колебательного движения дает возможность рассмотреть отдельно переходные индуктивные процессы, противодействующие

изменению магнитного потока источника. И, таким образом, определить ту часть диссипативных потерь, которые связаны только с вертикальными колебаниями.

Данная физическая модель имитирует реальные колебания магнита $z = z(t)$.

Для детального анализа рассмотрим физическую картину происходящих процессов с энергетической точки зрения.

Колебания в вертикальном направлении увеличивают кинетическую энергию магнита. Те же колебания индуцируют в путевых контурах токи, забирающие у магнита энергию, в соответствии с темпом ее диссипации. От баланса поступлений и потерь энергии зависит характер изменения амплитуды возмущений. Если скорость диссипации энергии в путевой структуре больше скорости возрастания энергии колебаний бортового магнита, то амплитуда вертикальных колебаний при движении стабилизируется или даже уменьшается.

Решение задачи состоит, таким образом, в сравнении темпа роста рассеиваемой тепловой энергии и механической энергии колебаний при увеличении амплитуды вертикальных колебаний.

Периодические поступления механической энергии в ходовую часть дают результат в виде увеличения максимальной скорости \dot{z}_m циклического поперечного смещения. Максимального значения скорости \dot{z}_m магнит достигает в точке пересечения его колебательной траектории с линией начального или усредненного клиренса h . В моменты времени, соответствующие этим точкам, потенциальная энергия магнита равна нулю вследствие равенства сил $F_L(z) = mg$, следовательно, энергия колебаний магнита равна его кинетической энергии.

Вычисление механической компоненты энергии проводится путем определения хода зависимости \dot{z}_m и далее $-m\dot{z}_m^2(t)/2$ в последовательности указанных точек траектории.

Диссипативная компонента энергетического баланса магнита вычисляется следующим образом. Определяются токи, индуцируемые в трех путевых контурах бортовым магнитом, который колеблется с заданной амплитудой $z = z(t)$, и соответствующая им степень диссипации энергии.

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

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 ее центра масс; g – ускорение силы тяжести; сила взаимодействия рамки с вихревыми токами, наводимыми в дискретной путевой структуре при движении

$$F_z = I_0 \sum_{i=1}^N I_i \frac{\partial M_{0i}(Vt - x_i, z)}{\partial z};$$

I_i – токи, наводимые в контурах путевой структуры; M_{0i} – коэффициенты взаимной индукции бортовой рамки и путевых контуров.

Для переходных процессов в короткозамкнутых контурах справедливы уравнения

$$L_k \frac{dI_k}{dt} + \sum_{i=1}^N I_i \frac{dM_{ik}}{dt} + R_k I_k = , \\ = -I_0 \frac{dM_{0k}}{dt} \quad (k=1, 2 \dots N) \quad (2)$$

где L_k, R_k – собственная индуктивность и сопротивление путевого токового контура; M_{ik} – коэффициенты взаимной индукции; N – число контуров дискретной путевой структуры.

Для соосно ориентированных контуров путевой структуры и движущегося бортового магнита, имеющих одинаковую ширину выражения для коэффициентов взаимной индукции имеют вид [7].

Легко заметить, 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:

$$z_{t=0} = h + \Delta z_0, \quad \dot{z}_{t=0} = \dot{z}_0, \quad I_k|_{t=0} = 0,$$

где Δz_0 – начальное вертикальное возмущение.

Данная математическая модель была использована для расчета амплитуды вертикальных колебаний в исследуемой системе электродинамической левитации.

Рассматривались колебания единичного бортового магнита с током $I_0 = 10^5$ А. Его длина составляла $l_0 = 1$ м, ширина $b_0 = 0,3$ м, начальное возмущение $\Delta z_0 = 0$. В качестве путевых контуров были выбраны квадратные рамки длиной $l_i = 0,3$ м, выполненные из алюминиевой проволоки радиусом $\delta_i = 0,15$ м. Расстояние между путевыми контурами d равнялось $0,03$ м.

На втором этапе решения поставленной задачи использовалась, так называемая, «статическая» модель, имитирующая только колебательную компоненту. Определялась энергия рассеивания в путевом стационарном контуре, моделирующем дискретную путевую структуру, по формуле

$$E_r = \int_0^t RI_r^2 dt.$$

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

$$L_r \frac{dI_r}{dt} + R_r I_{kr} = -I_0 \frac{dM_{0r}}{dt}$$

при начальном условии $I_r(0) = 0$.

В проводимых расчетах второго этапа длина моделирующего короткозамкнутого токового контура составляла также $l_r = 1$ м.

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

Расчеты проводились в широком диапазоне изменения продольных скоростей движения левитирующего транспортного средства.

Сопоставление результатов расчетов энергии рассеивания в контурах путевой структуры E_r (кривая 1) для продольной скорости движения $V = 80$ м/с и максимальной кинетической энергии колебаний бортового магнита

$$E_m = m\dot{z}_m^2(t) / 2$$

(кривая 2) иллюстрирует рис. 2.

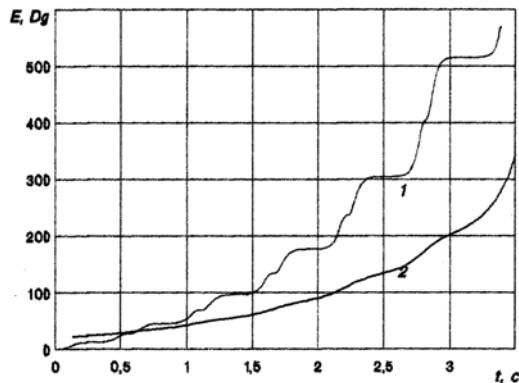


Рис. 2. Изменение энергии рассеивания и энергии колебаний магнита в зависимости от времени: 1 – энергия рассеивания; 2 – энергия колебаний

Анализ полученных результатов показал, что на начальном этапе движения магнита прирост кинетической энергии его вертикальных колебаний опережает рост энергии диссипации для всех скоростей V . Для всех продольных скоростей имеется точка, в которой наблюдается равенство энергий E_m и E_r . При дальнейшем развитии процесса потери энергии превышают ее прирост. Это означает, что в начале движения амплитуда колебаний увеличивается вплоть до момента, соответствующего равенству энергий. Далее магнит теряет энергии больше, чем получает. Когда энергии уравниваются, магнитная система возвращается к балансу, соответствующему точке пересечения кривых (1) и (2) (см. рис. 2). Следовательно, точка пересечения энергий показывает, когда начинается стабилизация вертикальных колебаний. Для различных скоростей движения равенство энергий наступает через разное время от начала движения.

Главным следствием проведенного анализа является тот факт, что приход и расход энергий в принципе могут уравниваться.

Для практической разработки экипажей важно также и то, что энергии уравниваются в большом диапазоне скоростей, что уравнивание

наступает на начальных стадиях движения, когда левитация еще не потеряла устойчивости из-за возможного увеличения амплитуды колебаний экипажа. Это свидетельствует об эффективности возбужденных колебаниями процессов самостабилизации.

Использование энергетического подхода для описания магнитной левитации позволяет анализировать не всю сумму возможных работ системы против сил сопротивления движению, а только ту часть потерь, которая связана с колебательной компонентой динамики экипажа.

Как установлено выше, часть энергии тяги, преобразованной на экипаже в колебания, забирают детали путепровода в форме рассеиваемой доли индуцированных токов. Остаточную энергию система сохраняет. Она может быть диссипирована только на экипаже.

Проанализируем особенности механизма потерь энергии, связанных с колебательной компонентой. Механическая система транспортного средства сохраняет определенный уровень остаточной энергии, определяемой пороговой точкой начала самостабилизации. При увеличении скорости движения пороговая точка смещается.

На рис. 3 представлены результаты расчетов энергии самостабилизации в зависимости от скорости для различных масс экипажа.

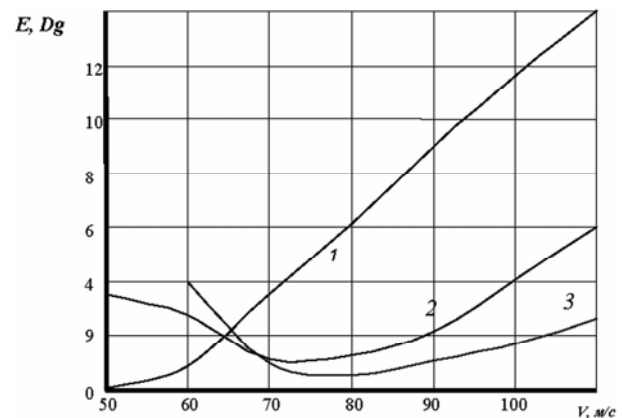


Рис. 3. Изменение энергии самостабилизации магнита в зависимости от продольной скорости: 1 – $m = 190$ кг; 2 – $m = 220$ кг; 3 – $m = 250$ кг

Как показали расчеты, для экипажей различных масс характер изменения положения точки самостабилизации в зависимости от скорости существенно меняется. Для $m = 190$ кг наблюдается быстрый и монотонный рост остаточной колебательной энергии. Для $m = 220$ кг функция, характеризующая эту зависимость, имеет минимум районе 75 м/с. Минимум функции становится более отчетливым и глубоким для $m = 250$ г и смещается в область значений

скоростей 80...85 м/с. Для всех скоростей исследованного диапазона значение остаточной энергии, не подавляемой средствами самой системы подвеса, существенно уменьшается при увеличении массы магнита. Физический смысл и технические перспективы полученного результата могут быть отчетливо проинтерпретированы на бинарной модели экипажа (рис. 1), наиболее часто используемой исследователями.

Экипаж состоит из ходовой и бортовой частей. Ходовая часть объединяет все силовые узлы (криомодули) на общей раме, а бортовая состоит из салона для пассажиров и служебного оборудования. Обе части соединены между собой в вагон при помощи рессор. Рессоры выполнены в виде упругодиссипативных элементов, частично демпфирующих все импульсные или колебательные возмущения, поступающие от путевой структуры. Обмен энергиями между массами ходового и бортового отдела экипажа зависит от места размещения рессор, то есть определяется отношением масс обеих частей. В распространенных схемах структуры экипажа рессоры вторичной подвески устанавливались или на каждом криомодуле в отдельности, или же на ходовой тележке, объединяющей все бортовые магниты. Такая конструкция представляется нам недостаточно эффективной.

Данная модель позволяет перераспределить массы без изменения их суммы. Кроме того, можно практически воспользоваться полученным результатом, состоящим в появлении минимума уровня остаточной колебательной энергии при увеличении массы ходовой части (см. рис. 3), путем фиктивного увеличения этой массы за счет бортовой. С криомодулями следует жестко связать максимум узлов всего экипажа: кузов, внутреннее оборудование и т. п. Подрессориванию подлежит только комплекс посадочных мест. В конструктивном плане это означает смещение рессорной группы вторичной подвески. Фиктивное утяжеление ходовой части является более рациональным, поскольку при этом минимизируется остаточная энергия и ее гашение на креслах вагона не составит проблемы. При этом попутно решается проблема резонансных явлений. Одиночный силовой узел фактически не защищен от резонанса. Жесткое закрепление сверхпроводящих магнитов на подавляющей части инерционной массы экипажа снимает также опасность резонансных реакций отдельных узлов, не сбалансированным по собственным частотам.

Полученные результаты могут быть использованы разработчиками экипажей высокоскоростного наземного транспорта для увеличения резервов самостабилизации системы подвеса вместо совершенствования механических диссипативных элементов, усложняющих конструкцию.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

На основании общепринятых математических упрощений показано, что диссипация энергии на всех скоростях продольного движения, реализуемых в системах высокоскоростного наземного транспорта на сверхпроводящих магнитах, с некоторого момента времени становится больше прироста механической энергии колебаний экипажа. Это означает, что система электродинамической левитации даже в простейшем ее виде обладает резервами самостабилизации. Теоретически предсказанная опасность неограниченного роста амплитуды вертикальных колебаний на практике не является неизбежной.

Исследования также показали, что полного подавления колебательной компоненты не происходит, однако, интенсивность остаточных колебаний ограничена и полученные результаты дают основания для их уменьшения конструктивными приемами.

Авторами получены конкретные технологические ориентиры для разработки структурной схемы магнитолевитирующих транспортных средств, обладающих повышенными резервами самостабилизации вертикальных колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байко А. В. О вертикальной неустойчивости в системах электродинамического подвешивания экипажей ВСНТ / А. В. Байко, К. Э. Воеводский // Изв. ВУЗов СССР. Электромеханика. – 1979. – № 11. – С. 983–990.
2. Кочетков В. М. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи / В. М. Кочетков, К. И. Ким, И. И. Трещев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981, – № 1. – С. 72–91.
3. Дзензерский В. А. Устойчивость вертикальных колебаний в системах электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой / В. А. Дзензерский, А. А. Зевин, Л. А. Филоненко // Прикладная механика. – 1995. – Т. 31, № 7. – С. 88–93.
4. Горский О. И. Частотные характеристики многоконтурных систем подвешивания / О. И. Горский, В. А. Дзензерский, Э. А. Зельдина // Изв. РАН «Энергетика и транспорт», – 1992. – Т. 38. – С. 125–129.
5. Дзензерский В. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильевы др. – К.: Наук. думка. – 2001. – 318 с.
6. Дзензерский В. А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах.– Д.: Арт-Пресс. – 2003. – 232 с.
7. Kratki N. Ausgleichs organge and schwingungen beimelec namischen magnetkissen system / N. Kratki, K. Oberreti // Archiv fur elecrcutechnik BRD. – 1975. – V. 67, № 2. – P. 59–87.

Поступила в редколлегию 20.06.2006.