

УСЛОВИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ ЭКИПАЖЕЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

На основании теоретических исследований пространственных колебаний и устойчивости движения экипажей на сверхпроводящих магнитах вдоль плоской путевой структуры определены условия, при которых коэффициенты вязкого сопротивления демпферов могут быть в значительной степени уменьшены по сравнению с принятыми для варианта с несколько измененными параметрами, обеспечивающими устойчивость невозмущенного движения экипажа. Эта цель достигается путем сравнения характера взаимодействия электродинамических сил двух сверхпроводящих магнитов, движущихся вдоль полосы путевых неферромагнитных контуров, при их взаимных смещениях в поперечном направлении для различных вариантов размещения магнитов и последующего вывода о возможности понижения уровня демпфирования, обеспечивающего устойчивость невозмущенного движения экипажа вдоль путевой структуры прямолинейного и криволинейного очертания в плане.

Методы исследования теоретические с использованием численного интегрирования дифференциальных уравнений. Понижение уровня демпфирования, при котором достигается устойчивость движения экипажа, возможно при более выраженном характере взаимодействия сверхпроводящих магнитов с путевыми контурами, соответствующем нисходящей зависимости электродинамических сил взаимодействия сверхпроводящих магнитов с путевыми контурами при их относительном перемещении в поперечном направлении, и более выраженном минимуме вертикальных электродинамических сил в положении, когда продольные оси экипажа и путевой структуры находятся в одной вертикальной плоскости. Результаты исследований содержат элемент новизны и имеют практическую значимость.

На основі теоретичних досліджень просторових коливань і стійкості руху екіпажів на надпровідних магнітах вздовж плоскої шляхової структури визначені умови, що забезпечують стійкість левітаційного руху екіпажу на надпровідних магнітах вздовж плоскої шляхової структури при низьких значеннях дисипативних коефіцієнтів. Ця ціль досягається шляхом порівняння характеру взаємодії електродинамічних сил двох надпровідних магнітів, що рухаються вздовж полоси шляхових неферромагнітних контурів при їх взаємних поперечних зміщеннях, для різних варіантів розташування магнітів і наступному висновку про можливість зниження рівня показника демпфування, що забезпечує стійкість левітаційного незбуреного руху екіпажу вздовж шляхової структури прямолінійного та криволінійного окреслення в плані.

Методи досліджень теоретичні з використанням числового інтегрування диференціальних рівнянь. Зниження рівня демпфування, при якому досягається стійкість руху екіпажу, можливе при більш вираженому характері взаємодії надпровідних магнітів з шляховими контурами, які відповідають низхідній залежності електродинамічних сил взаємодії надпровідних магнітів з шляховими контурами при їх відносному переміщенні в поперечному напрямку і більш вираженому мінімуму вертикальних електродинамічних сил в положенні, при якому продольні осі екіпажу і шляхової структури знаходяться в одній вертикальній площині. Результати досліджень мають елементи новизни і практичну значимість.

Based on theoretical investigations of the 3-D vibrations and the stability of motion of vehicles on the superconducting magnets along the plane track structure, conditions under which coefficients of a viscous resistance of dampers can be significantly reduced in comparison with the accepted ones for a version with slightly changed parameters providing the stability of an undisturbed motion of a vehicle are defined. This aim is achieved by comparing the character of interactions between electrodynamic forces of two superconducting magnets moving along the strip of track non-ferromagnetic contours, when they are mutually displaced in a cross direction for various versions of magnet locations, and the subsequent conclusion about the possibility of decreasing the damping level providing the stability of an undisturbed motion of a vehicle along the track structure of straight and curved shapes in plane.

The theoretical methods with a numerical integration of the differential equations are employed. Decrease in the damping level resulting in the stability of the vehicle motion is possible with a more pronounced character of interactions between the superconducting magnets and the track contours corresponding to the descending dependency of electrodynamic forces of interactions between the superconducting magnets and the track contours in their relative displacements in a cross direction, and with a more pronounced minimum of vertical electrodynamic forces at the position when longitudinal axes of the vehicle and the track structure are in the same vertical plane. The research results are novel and of practical significance.

Устойчивое левитационное движение экипажей на сверхпроводящих магнитах вдоль плоскости путевой структуры может быть обеспечено, как показали результаты проведенных ранее исследований [1], путём рационального выбора габаритов сверхпроводящих магнитов и путевых контуров, их

взаимного размещения и параметров упруго-диссипативных элементов рессорного подвешивания экипажа, а также необходимого значения намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов.

Степень устойчивости экипажа и необходимый уровень демпфирования его рессорного подвешивания, при котором обеспечивается устойчивость движения экипажа, в значительной степени зависят, как будет показано ниже, не только от размеров путевых контуров и сверхпроводящих магнитов, но и от взаимного их расположения. Проиллюстрируем это на примере, в котором оцениваются пространственные колебания и устойчивость движения экипажа транспортной системы вдоль плоской путевой структуры, имеющей следующие конструктивные особенности.

Кузов экипажа массой 25,0 т опирается посредством рессорного подвешивания на 2 тележки (каждая по 3,75 т), на донных поверхностях которых крепятся 24 сверхпроводящих магнита. Они расположены в четыре ряда в поперечном направлении (по два ряда над каждой из двух полос путевых короткозамкнутых контуров прямоугольного очертания, разнесенных по ширине экипажа), а в продольном направлении две пары блоков (каждый из которых состоит из двух магнитов) расположены по краям каждой из тележек и одна пара блоков (состоящих из двух магнитов) расположена посередине длины тележек над каждой из полос токопроводящих контуров. Таким образом, на каждую из тележек приходится по 12 сверхпроводящих магнитов, т. е. по 6 магнитов (по 3 блока из двух магнитов) на левой и правой её стороне. Проекция продольной оси каждого блока (проходящая посередине между двумя магнитами, входящими в этот блок) на плоскость путевой структуры совпадает с продольной осью соответствующей ему полосы контуров путевой структуры.

Такая схема расположения сверхпроводящих магнитов и путевых контуров обеспечивает при рациональном выборе их размеров, как показали результаты расчётов, устойчивость левитационного движения экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры.

Оценка пространственных колебаний и устойчивости левитационного движения экипажа проводилась на основании интегрирования уравнений, описывающих движение экипажа как трёхмассовой системы твёрдых тел (кузова и двух тележек с прикреплёнными сверхпроводящими магнитами), и изменение наведенных токов в контурах путевой структуры [1]. Математическая модель движения экипажа не приводится из-за её громоздкости. Её структура такая же, как и для математической модели, приведенной в работе [1].

В качестве критериев для оценки левитационного движения экипажа были приняты при скоростях 30 и 100 м/с линейные и угловые перемещения твёрдых тел, ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлении и значения намагничивающих сил в соленоидах.

На основании поиска рациональных значений размеров сверхпроводящих магнитов и путевых контуров приняты длины соленоидов магнитов равными 1,2 м, а путевых контуров – 1,0 м при расстоянии между ними в продольном направлении, равном 0,1 м; значения ширины соленоидов и контуров приняты соответственно равными 0,2 м и 0,4 м, значение диаметра прутков путевых контуров – 0,03 м, жёсткость каждого из восьми упругих элементов рессорного подвешивания в вертикальном и поперечном направлении – 200 кН/м. Примечательно, что устойчивость движения экипажа обеспечивается

при определённых значениях расстояния в поперечном направлении b_0 между продольными осями соленоидов входящих в один блок. В рассматриваемом случае были приняты два варианта значений этого расстояния: $b_0 = 0,3$ м (вариант I) и $b_0 = 0,35$ м (вариант II). Для этих вариантов при поперечном перемещении y_0 блоков соленоидов, состоящих из двух магнитов, относительно путевых контуров имеет место нисходящая зависимость касательных электродинамических сил в поперечном направлении и минимальное значение нормальных электродинамических сил в вертикальном направлении, соответствующее положению экипажа, когда его продольная ось и ось путевой структуры находятся в одной вертикальной плоскости (см. рис. 1а для варианта I и рис. 1б для варианта II). Это основные условия обеспечения устойчивости движения экипажа вдоль плоской путевой структуры.

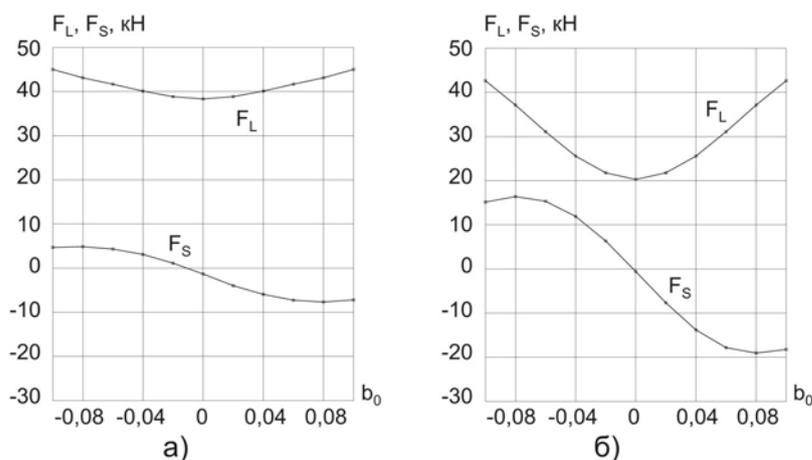


Рис. 1

Как видно из приведенных графиков на рис. 1а, 1б, нисходящая зависимость касательных сил F_S взаимодействия соленоидов и путевых контуров, также как и минимум вертикальных сил F_L , в значительно большей степени выражены для варианта II расположения соленоидов, чем для варианта I, что является условием, как будет показано ниже, существенного уменьшения коэффициентов вязкого сопротивления демпферов экипажа, необходимого для обеспечения устойчивости экипажа и повышения степени его устойчивости.

Так, для транспортной системы, соответствующей варианту I расположения соленоидов (см. рис. 2), обеспечивается устойчивость движения экипажа в прямолинейных и криволинейном (радиусом 8000 м) участках пути при значениях коэффициентов вязкого сопротивления в поперечном и вертикальных направлениях соответственно равных 2,5 кН·с/м и 10 кН·с/м.

На рис. 2 приведены графики зависимостей от пройденного пути S перемещений кузова (линии 3) и тележек (линии 1, 2) в вертикальном направлении (а), углов галопирования φ (б), бокового отхода y (в), боковой качки θ (г), углов виляния ψ (д) и ускорений кузова в вертикальном \ddot{z}_k и поперечном \ddot{y}_k направлениях (е) в случае движения экипажа при скорости $v = 100$ м/с по участкам пути прямолинейного и криволинейного очертания в плане для варианта I размещения сверхпроводящих магнитов.

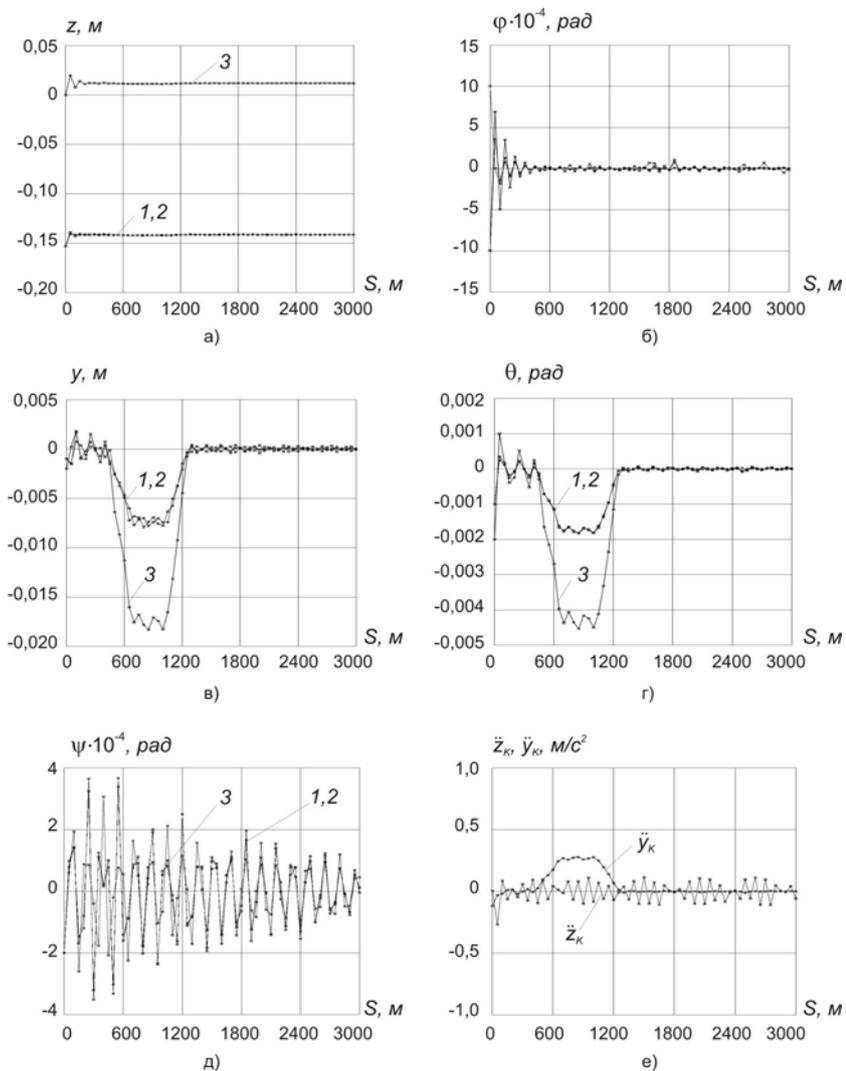


Рис. 2

Для транспортной системы, соответствующей варианту II расположения соленоидов сверхпроводящих магнитов (см. рис. 3), устойчивость движения экипажа обеспечивается при значениях этих коэффициентов, равных в вертикальном направлении $5,0 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$, а в поперечном направлении равных нулю. Для варианта I расположения соленоидов при этих значениях коэффициентов вязкого сопротивления движение экипажа неустойчиво. При этом значения намагничивающей силы в соленоидах получены для вариантов I и II соответственно равными $4,27 \cdot 10^5$ и $6,88 \cdot 10^5 \text{ А}\cdot\text{витков}$.

Рассматривалось левитационное движение экипажа по участку пути следующего очертания в плане: прямолинейный участок, входная переходная кривая, круговая кривая радиусом $R = 8000 \text{ м}$, выходная переходная кривая и прямая с протяженностью каждого из участков, равной соответственно 250, 500, 150, 450 и 1650 м. Угол наклона поверхности путевой структуры путевой кривой был принят равным $0,1 \text{ рад}$ в сторону центра кривизны, а переходных кривых – пропорциональным кривизне пути.

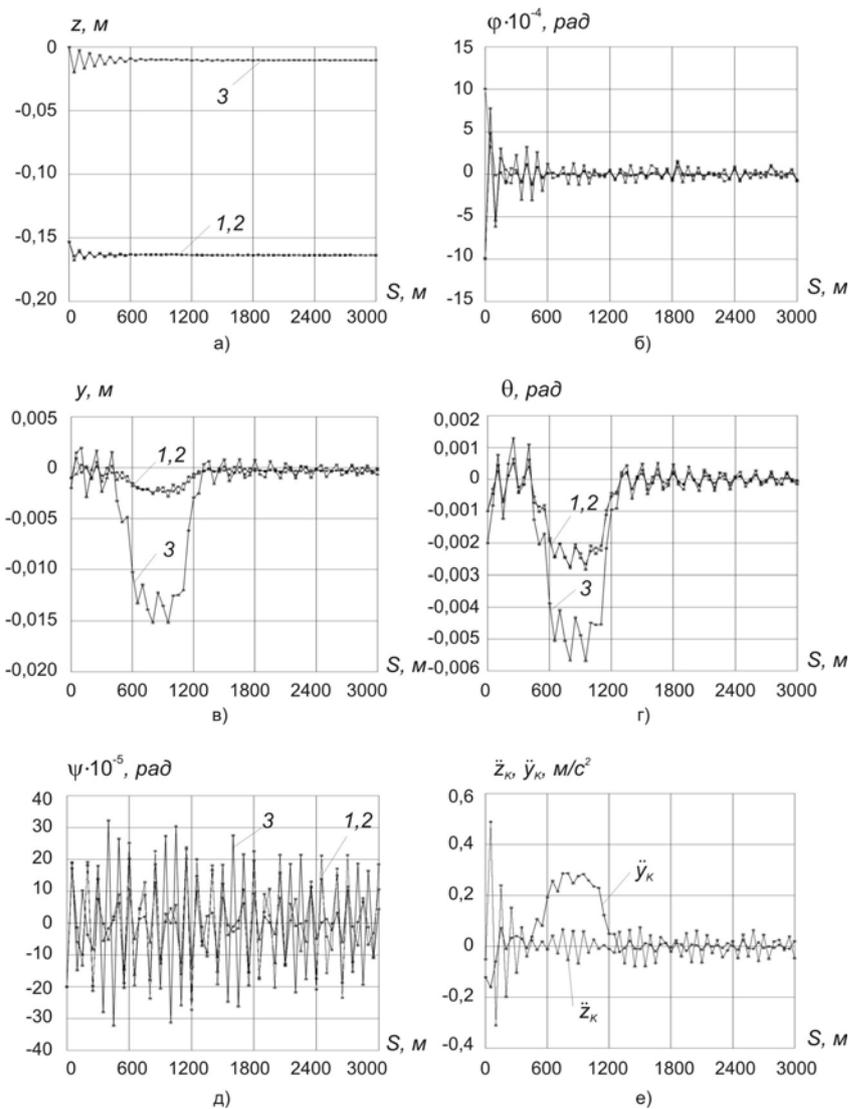


Рис. 3

Как видно из приведенных графиков, движение экипажа для обоих вариантов расположения сверхпроводящих магнитов на всех участках путевой структуры устойчиво, перемещения твердых тел небольшие, а ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях имеют приемлемые значения. Затухание колебаний кузова обусловлено вертикальным демпфированием из-за связанности уравнений, соответствующие вертикальным и горизонтальным колебаниям.

Таким образом, можно значительно уменьшить коэффициенты вязкого сопротивления демпферов, необходимые для обеспечения устойчивости движения экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры.

1. Дзензерский В. А. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций на сверхпроводящих магнитах / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко, В. В. Малый. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС. – 2011. – 248 с.

Институт транспортных систем
и технологий НАН Украины,
Днепропетровск

Получено 15.11.12,
в окончательном варианте 25.06.13