УДК 001.5.629.11.534

В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, Т. И. КУЗНЕЦОВА, Н. А. РАДЧЕНКО, Н. М. ХАЧАПУРИДЗЕ

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ ВДОЛЬ ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Левитационное движение экипажа электродинамической системы с плоской путевой структурой может быть реализовано в системах с двумя или четырьмя рядами путевых контуров. Из соображений, связанных с небольшим расходом неферромагнитного материала для путевых контуров, интересно выяснить возможность реализации левитационного движения в случае, когда на плоской путевой структуре уложен один ряд путевых контуров. Для решения этой задачи предложена конструктивная схема транспортной системы, в которой кузов экипажа опирается на две тележки посредством упруго-вязких элементов в вертикальном и поперечном направлениях, а на донных поверхностях тележек крепятся по 8 сверхпроводящих четырехугольных магнитов, продольные стороны которых расположены над продольными сторонами путевых контуров и 16-ти сверхпроводящих магнитов. Новизна состоит в возможности применения в плоской путевой структуре одного ряда путевых контуров. На основании решения дифференциальных уравнений, описывающих движение экипажей и их пространственных колебаний, а также изменение токов в путевых контурах, оценена устойчивость и вибронагруженность левитационного движения экипажа вдоль прямолинейных и криволинейных участков пути, сделан вывод о целесообразности применения разработанных конструктивных схем транспортной системы.

Левітаційний рух екіпажу електродинамічної транспортної системи з плоскою шляховою структурою може бути реалізований в системах з двома и чотирма рядами шляхових контурів. З міркувань, зв’язаних з невеликими витратами неферромагнітного метала на шляхові контури, цікаво вияснити можливість реалізації левітаційного руху екіпажу в випадку, коли на плоскій шляховій структурі прикріплений один ряд шляхових контурів. Для вирішення цієї задачі запропонована конструктивна схема електродинамічної транспортної системи, в якій кузов екіпажу опирається за допомогою упруго-диссипативних елементів в вертикальному і поперечному напрямку, а на донних поверхнях кожного з двох візків кріпляться по 8 надпровідних магнітів чотирикутного окреслення в плані, поздовжні сторони яких розміщені над поздовжніми сторонами шляхових контурів. Новизна складається з можливості використання одного ряда контурів в плоскій шляховій структурі і 16-ти надпровідних магнітів. На підставі рішень диференційних рівнянь, що описують рух екіпажу і його просторові коливання та зміну струмів в шляхових контурах, оцінено його стійкість руху і вібронавантаженість та зроблено висновок про доцільність використання розробленої конструктивної схеми транспортної системи.

A magnetically levitated motion of the vehicle of an electrodynamic system with a plane track structure can be realized in the systems with two or four lines of the track contours as illustrated by studies. Based on the concepts associated with small amounts of a non-ferromagnetic material for the track contours, the possibility of a magnetically levitated motion in the case that one line of the track contours is stacked on a plane track structure may be of interest. To attain this, a structural arrangement of a transport system is proposed. In this case the body rests on two bogies using the elastic and viscous members in vertical and transverse directions. The 8 superconducting square magnets whose longitudinal sides are located above the longitudinal sides of the track contours and 16 superconducting magnets are mounted on the bottom surfaces of bogies. Novelty lies in the possibility of applying one line of the track contours for a plane track contour. Based on the solution of the differential equations describing the motion of vehicles and their 3D oscillation, as well as variations in current in the track contours, the stability and vibratory loads of the magnetically levitated motion of the vehicle along straight and curved paths of the track are estimated. A conclusion is made that the proposed structural arrangements of a transport system are efficient.

Ключевые слова: *Электродинамическая транспортная система, плоская путевая структура, устойчивость движения, сверхпроводящие магниты, кривизна пути.*

При исследовании пространственных колебаний экипажа выберем в качестве обобщенных координат линейные вертикальные z и поперечные y перемещения твердых тел системы, их угловые перемещения θ, φ, ψ, соответствующие боковой качке, галопированию и вилянию, а также токи в путевых контурах (ось координат z направлена сверху вниз).

Математическая модель движения исследуемого экипажа вдоль плоской путевой структуры представляется в виде связанных дифференциальных уравнений Лагранжа, описывающих перемещения твердых тел системы, и уравнений токов в токопроводящих контурах путевой структуры. Подробно математическая модель движения экипажа не приводится из-за ее громоздкости, поэтому приведем математическую модель движения экипажа в общем виде.

Уравнения состояния транспортной системы: колебания экипажа и изменение токов в токопроводящих контурах путевой структуры будем получать с помощью уравнений Лагранжа II-го рода, которые можно представить в виде:

$$D_{qv} + \Pi_{qv} + \Phi_{qv} = Q_v, \quad (\text{v} = 1,2,..., \text{N}), \tag{1}$$

и уравнений токов, которые в матрично-векторном виде имеют вид:

$$L\frac{dI}{dt} + rI = f\ , \tag{2}$$

где

$$D_{qv} = \frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v}; \quad \Pi_{qv} = \frac{\partial \Pi}{\partial q_v}; \qquad \Phi_{qv} = \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v}; \quad Q_v = f(F_L, F_s); \tag{3}$$

Q_v – обобщенные силы, являющиеся функцией электродинамических сил F_L, F_s, действующих на экипаж в поперечных, вертикальных плоскостях вдоль нормалей и касательных к поверхностям сверхпроводящих магнитов; N – число степеней свободы; $L = |L_{ik}|$ – матрица коэффициентов самоиндукции ($i = k$) и взаимоиндукции ($i \neq k$) путевых контуров; r – активное сопротивление путевого контура, I – вектор-столбец токов i_k в k-х путевых контурах, f – вектор э.д.с. f_k наводимых сверхпроводящими магнитами экипажа в k-х путевых контурах.

В выражениях (1), (2), (3): $D_{qv}, \Pi_{qv}, \Phi_{qv}$ – дифференциальные операторы и обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам q_v; T, Π, Φ – кинетическая, потенциальная энергия и функция рассеяния системы.

Величины f_k определяются из выражения:

$$f_k = -\sum_{m=1}^{n} i_m^c \frac{\partial M_{km}}{\partial t}, \tag{4}$$

где M_{km} – коэффициенты взаимоиндукции между m-м сверхпроводящим магнитом и k-м контуром; n – число поездных сверхпроводящих магнитов; i_m^c – ток в m-м сверхпроводящем магните.

Электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов с путевыми контурами F_{Lm}, F_{sm} вдоль нормали и касательной к поверхностям магнитов в поперечной плоскости определяются из выражения [1, 2]:

$$F_{Lm} = i_m^c \sum_{k=1}^{p} i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \Delta_m};$$
$$F_{sm} = i_m^c \sum_{k=1}^{p} i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \delta_m}, \qquad (5)$$

где Δ_m и δ_m – значения зазоров, т. е. смещений *m*-ых сверхпроводящих магнитов относительно контуров путевой структуры в вертикальном и поперечном направлениях; p – число учитываемых контуров.

Решая совместно системы уравнений вида (1) и (2), будем оценивать динамические качества экипажа в случае его левитационного движения.

Необходимым условием обеспечения устойчивого левитационного движения экипажа является выполнение следующего требования: движущиеся вдоль оси пути два магнита, расположенные в одной поперечной плоскости относительно путевых контуров, при их поперечном перемещении должны иметь нисходящую зависимость от пройденного пути касательных электродинамических сил взаимодействия с контурами, т. е. эти силы должны быть восстанавливающими против поперечного сдвига двух магнитов относительно контуров. Кроме этого, нормальные электродинамические силы при таком взаимодействии двух магнитов с контурами должны иметь минимальное значение в положении, соответствующем их симметричному расположению относительно продольной оси контуров.

Таким образом, для реализации устойчивого левитационного движения экипажа необходимо определить рациональные значения основных параметров системы, в первую очередь, размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов и путевых контуров, а также условия их взаимного размещения в состоянии равновесия экипажа.

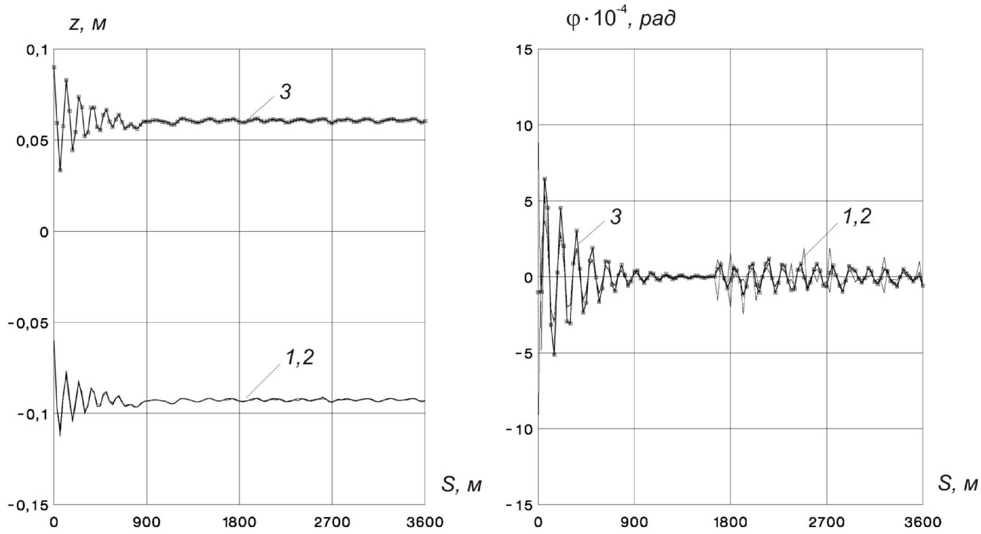
На основании полученных значений этих параметров сотрудниками Института транспортных систем и технологий НАН Украины предложена описанная ниже транспортная система с одним рядом контуров на плоской путевой структуре.

Для экипажа, масса кузова которого 25 т и масса двух тележек по 3,75 т получены рациональные значения размеров соответственно в продольном и поперечном направлениях соленоидов 16-ти сверхпроводящих магнитов, равные 1,2 и 0,5 м, и путевых контуров 1,0 и 1,2 м диаметром 0,03 м. Значения намагничивающих сил в соленоидах приняты равными 500000 Ампер-виткам.

Была проведена оценка пространственных колебаний экипажа, движущегося вдоль пути, имеющего следующее очертание в плане: прямолинейный участок пути протяженностью 150 м, входная переходная кривая длиной 500 м, круговая кривая радиусом 8000 м с наклоном поверхности пути к горизонтальной плоскости на угол 0,1 рад в сторону центра кривизны протяженностью 150 м, выходная переходная кривая – 400 м, прямая – 400 м. Кривизна переходных кривых имеет синусоидальную зависимость от их протяженности в соответствии с работой [2].

Оценка пространственных колебаний экипажей проводилась при значениях скорости движения 30 м/с и 100 м/с по значениям левитационных зазоров тележек, линейных и угловых перемещений твердых тел системы кузова и двух тележек, а также по значениям ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях.

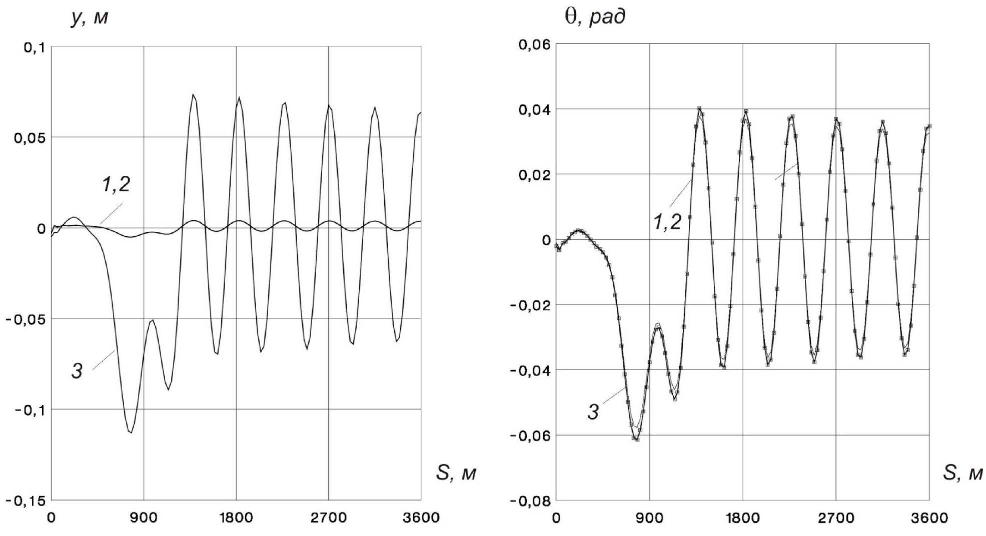
Результаты интегрирования уравнений движения экипажа (1) и изменений токов в путевых контурах (2) представлены при скорости 100 м/с в виде графиков зависимости от пройденного пути вертикальных перемещений z и углов подпрыгивания φ кузова, бокового относа y, боковой качки θ, углов виляния ψ и ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях $\ddot{y}_k$, $\ddot{z}_k$ (рис. 1, 2, 3), где линии 3 соответствуют кузову, а 1 и 2 – тележкам, $S \leq 150$ м и $S \geq 1200$ м – прямолинейным участкам пути, S = 150 – 650 м – входной переходной кривой, S = 650 – 800 м – круговой кривой и S = 800 – 1200 м – выходной переходной кривой.



а) б)

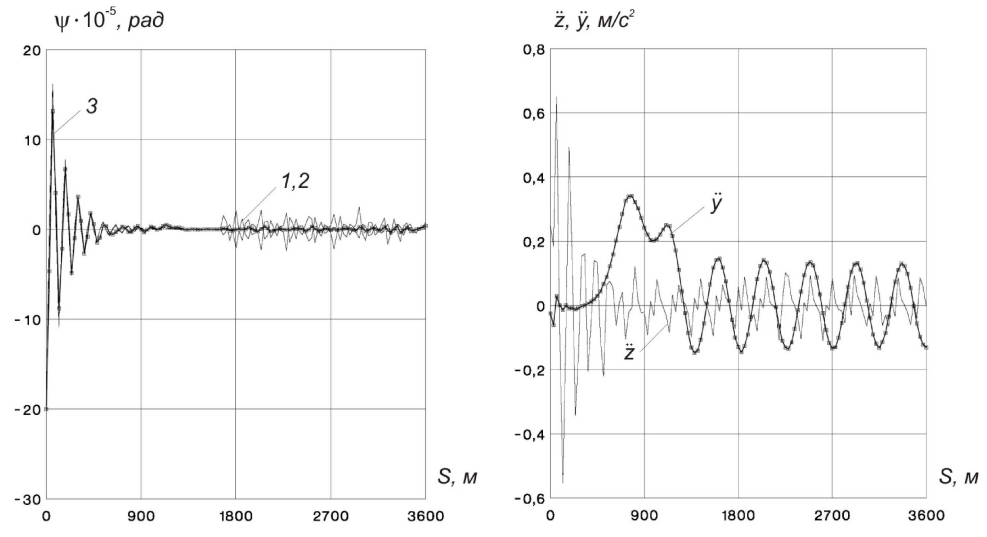
Рис. 1

.



а) б)

Рис. 2



а) б)

Рис. 3

Как видно из приведенных графиков, имеет место устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных и криволинейных участках пути, а ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях имеют небольшие приемлемые значения. Аналогичные результаты получены также для скорости 30 м/с.

Таким образом, предложенная электродинамическая транспортная система может рассматриваться как один из возможных вариантов при создании перспективных видов транспорта.

1. *Ворошилов А. С.* К выбору рациональных конструктивных схем электродинамических транспортных систем с плоской путевой структурой / *А. С. Ворошилов, Т. Л. Губа, О. В. Звонарева, Н. А. Радченко* // Техническая механика. – 2012. – № 4. – С. 8 – 12.
2. *Шахунянц Г. М.* Железнодорожный путь / *Г. М. Шахунянц*. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.

Институт транспортных систем
и технологий Национальной
академии наук Украины „Трансмаг”,
Днепропетровск

Получено 18.04.2016,
в окончательном варианте 12.06.2016