УДК 001.5.629.11.534

Н. А. РАДЧЕНКО, А. С. ВОРОШИЛОВ, О. В. ЗВОНАРЕВА

УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Предложена новая схема левитирующей транспортной системы с электродинамическим подвесом и плоской путевой структурой. Цель статьи состоит в оценке пространственных колебаний и устойчивости движения экипажа электродинамической транспортной системы. Метод исследования – теоретический, численный. Приведены результаты исследований, показывающие, что для предложенной конструктивной схемы транспортной системы с четырьмя полосами сверхпроводящих магнитов и двумя полосами путевых контуров имеет место устойчивость прямолинейного и криволинейного движения экипажа и приемлемые показатели комфорта пассажиров. Сделан вывод о возможности и целесообразности применения предложенной конструктивной схемы при создании новых транспортных систем.

Запропоновано нову схему левітаційної транспортної системи з електродинамічним підвісом і плоскою шляховою структурою. Ціль статі полягає в оцінці просторових коливань і стійкості руху екіпажу електродинамічної транспортної системи. Метод дослідження – теоретичний, числовий. Наведено результати досліджень, які показують, що для запропонованої конструктивної схеми транспортної системи з чотирма смугами надпровідних магнітів та двома смугами шляхових контурів має місце стійкість прямолінійного та криволінійного левітаційного руху екіпажу і прийнятні показники комфорту пасажирів. Зроблено висновок про можливість та доцільність використання запропонованої конструктивної схеми при створені нових транспортних систем.

A new scheme of a levitating transportation system with the electrodynamic suspension and the flat track is proposed. The purpose of the paper is to evaluate the spatial oscillations and the motion stability of the vehicle of the transportation system. The analytical and numerical methods are used. The obtained results show that the proposed system with the four rows of superconducting magnets and two rows of track profiles provides a stable rectilinear and curvilinear motion of the vehicle and acceptable passenger comfort. We came to the conclusion that the proposed design could be expediently used when creating new transportation systems.

***Ключевые слова**: электродинамическая транспортная система, путевая структура, устойчивость левитационного прямолинейного и криволинейного движения, сверхпроводящие магниты.*

В ранее изложенных разработках конструктивных схем электродинамических транспортных систем рассмотрены различные варианты использования числа полос и количества сверхпроводящих магнитов, а также путевых короткозамкнутых контуров [1]. Представляет интерес оценка устойчивости левитационного движения экипажа вдоль плоской путевой структуры прямолинейного и криволинейного очертания в плане в случае, когда на каждой из двух тележек экипажа крепятся 16 (четыре полосы) сверхпроводящих магнитов (по четыре магнита по краям тележек) и две полосы короткозамкнутых токопроводящих контуров прямоугольного очертания. Такая система может рассматриваться на основании решения комиссии НАН Украины как перспективная.

Размеры соленоидов сверхпроводящих магнитов в продольном и поперечном направлениях приняты соответственно 1,2 и 0,25 м, а путевых контуров – 1,0 и 0,5 м. Предполагается, что сверхпроводящие магниты расположены по обе стороны каждой полосы путевых контуров, расстояние в продольном направлении между которыми принято 0,1 м, причем расстояние в поперечном направлении между продольными осями контуров и каждым из двух соседних рядов сверхпроводящих магнитов соответствует 0,205 м.

Цель статьи состоит в установлении возможности использования описанной конструктивной схемы для создания электродинамической транспортной системы.

© Н. А. Радченко, А. С. Ворошилов, О. В. Звонарева, 2015

Актуальность работы обусловлена целесообразностью решения вопроса о выборе рациональной конструктивной схемы электродинамической транспортной системы с плоской путевой структурой.

Оценку левитационного движения экипажей будем проводить на основании исследований их пространственных колебаний при движении по прямолинейным и криволинейным участкам путевой структуры (постоянной и переменной кривизны). При этом считаем, что экипаж представляет собой электродинамическую систему, состоящую из трех твердых тел (кузова и двух тележек), к которым жестко прикреплены на их горизонтальных поверхностях сверхпроводящие магниты. В качестве обобщенных координат были выбраны вертикальные z и поперечные y перемещения твердых тел системы (координата z направлена сверху вниз), их угловые перемещения θ, φ, ψ, соответствующие боковой качке, галопированию и вилянию, а также токи в путевых контурах.

Математическая модель движения каждого из исследуемых экипажей была представлена в виде связанных дифференциальных уравнений Лагранжа, описывающих пространственные 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 движения экипажа и изменения токов можно получить с помощью уравнений Лагранжа II рода:

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

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

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

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

где 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; $D_{qv}, \Pi_{qv}, \Phi_{qv}, Q_v$ – дифференциальные операторы и обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам q_v; Т,П,Ф – кинетическая, потенциальная энергия и функция рассеяния системы; F_L, F_s –

нормальные и касательные электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов и путевых контуров.

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 выражений:

$$\begin{aligned} F_{Lm} &= i_m^c \sum_{k=1}^{p} i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial \Delta_m}, \\ F_{sm} &= i_m^c \sum_{k=1}^{p} i_k \frac{\partial M_{km}}{\partial ¢_m}, \end{aligned} \tag{5}$$

где Δ_m и δ_m – значения зазоров, т. е. смещений m-х 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 каждой из полос путевых контуров, при их поперечном перемещении должны иметь нисходящую зависимость 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 каждой из полос 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 при достаточном значении намагничивающих сил в соленоидах магнитов.

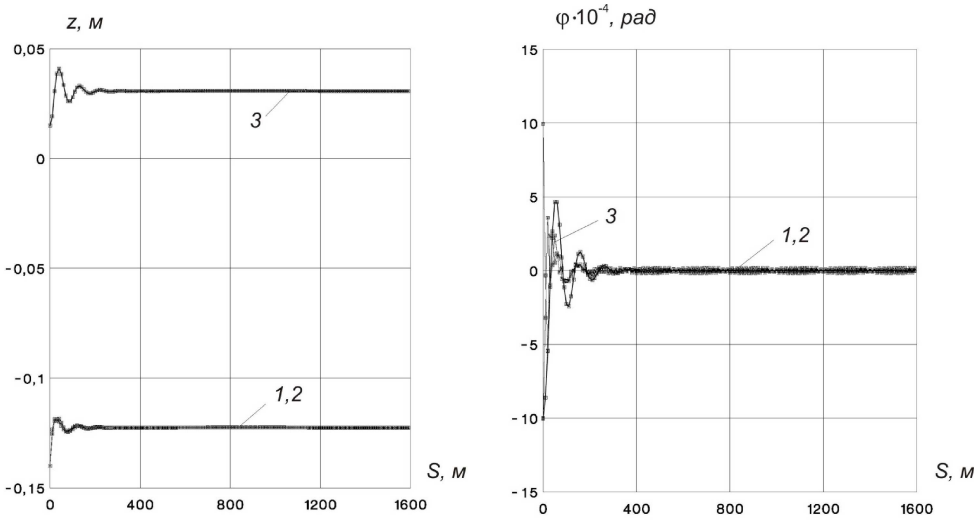
Сравнение упомянутых выше электродинамических систем проводилось для значений масс кузова и каждой из тележек экипажей, равных 25 т и 3,75 т, значений коэффициентов жесткости и вязкости упруго-диссипативных элементов в продольном и поперечном направлениях, равных соответственно 200 кН/м и 20 кНс/м.

Для экипажей описанной транспортной системы было оценено их левитационное движение 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 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, перемещениям всех твердых тел рассматриваемых систем, а также по значениям ускорений кузова экипажей в вертикальном и поперечном направлениях.

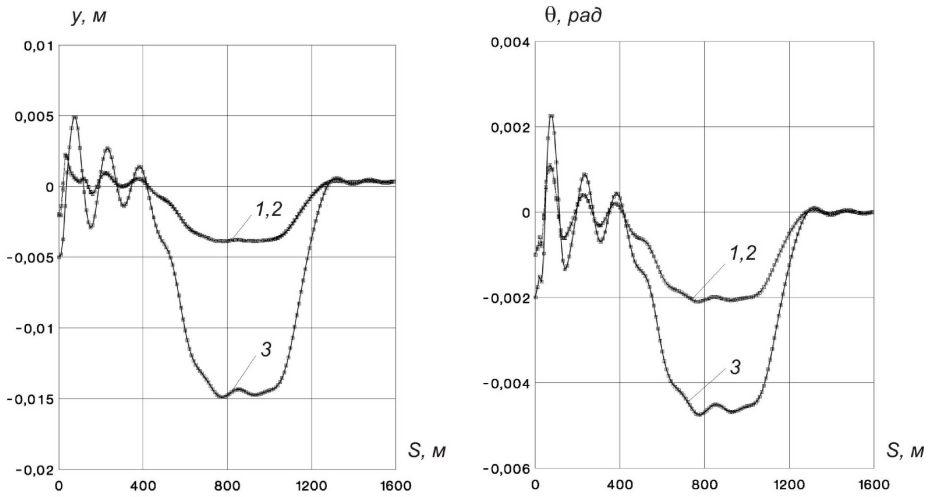
Рассмотрим приведенные результаты интегрирования уравнений движения (1) и (2) в виде графиков зависимостей от пройденного пути следующих величин: перемещений z кузова и тележек, углов галопирования φ, бокового относа y, боковой качки θ, углов виляния ψ и ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях $\ddot{y}_k$, $\ddot{z}_k$ при скоростях движения 100 м/с (рис. 1, 2, 3) и 30 м/с (рис. 4, 5, 6) , 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)

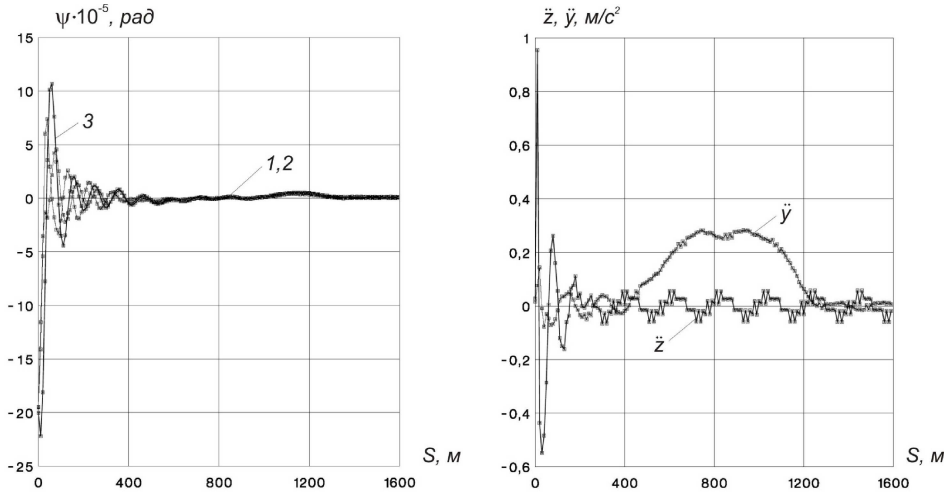
Рис. 1

.



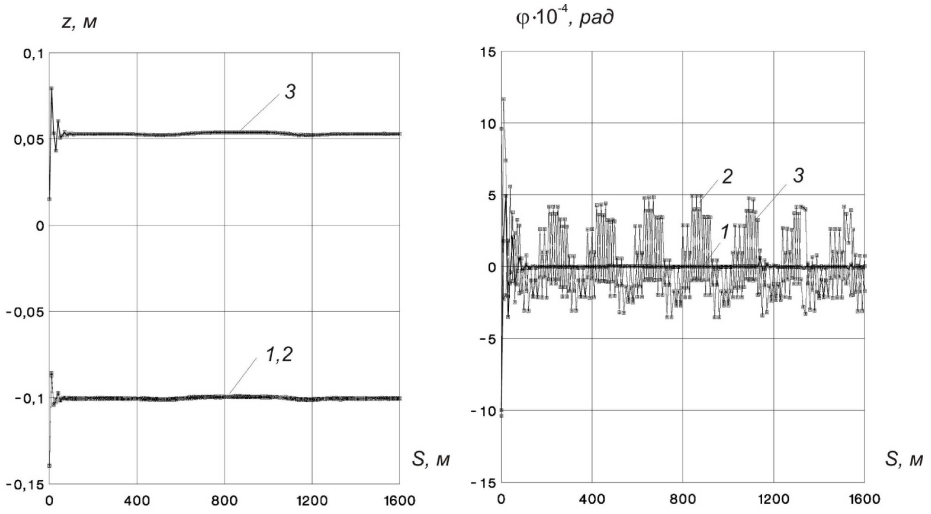
а) б)

Рис. 2



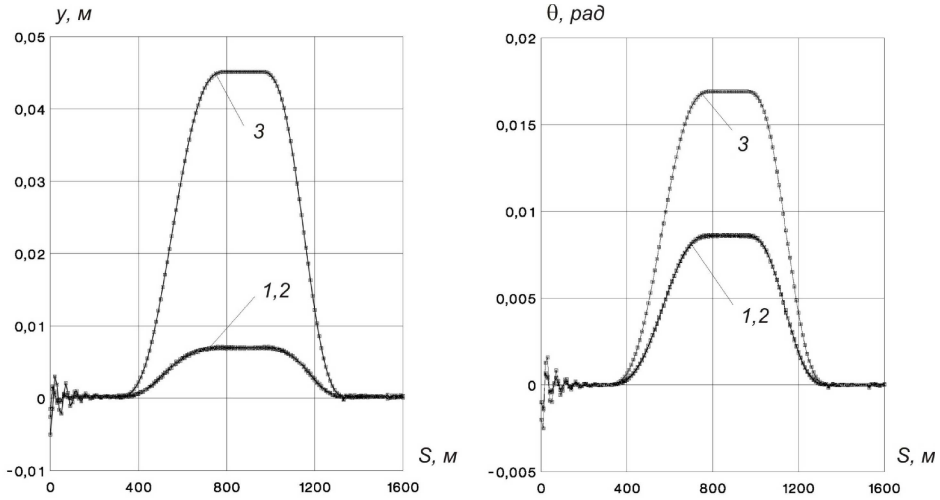
а) б)

Рис. 3



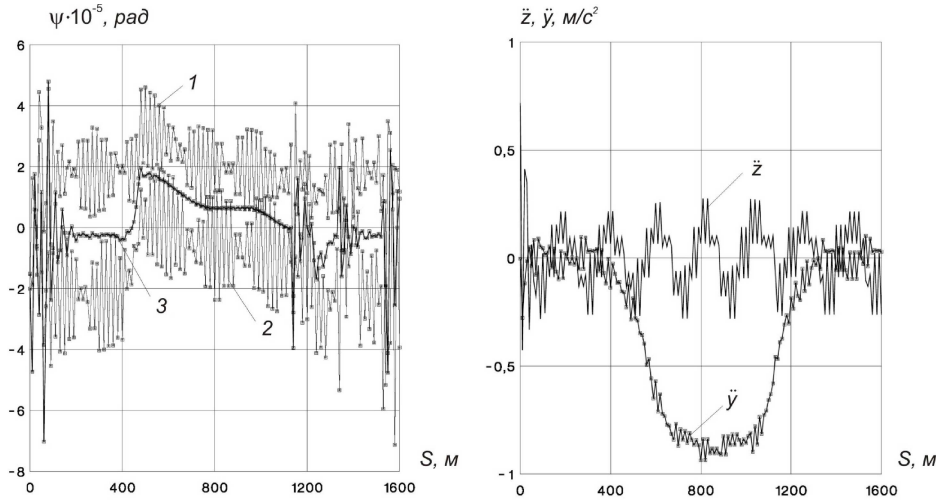
а) б)

Рис. 4



а) б)

Рис. 5



а) б)

Рис. 6

Результаты интегрирования уравнений движения показали, что на вертикальные перемещения кузова и тележек z_i (i = 1, 2 – номера тележек), углы их галопирования и виляния практически не оказывает влияния кривизна пути, а перемещения бокового относа y_i и углы боковой качки θ_i имеют максимальные значения в круговой кривой. Поэтому в дальнейшем будем оценивать левитационное движение экипажей по максимальным перемещениям его твердых тел. В частности, по поперечным перемещениям кузова и тележек y_k и y_i, углам их боковой качки θ_k, θ_i, по вертикальным перемещениям тележек $z_{i,}$, по значениям ускорений в поперечном и вертикальном направлениях кузова $\ddot{y}_k$, $\ddot{z}_k$ соответственно, и по значениям намагничивающих сил в соленоидах, обеспечивающих левитационное движение – Ni, равных в рассматриваемом случае 700000 ампер-витков

Как видно из этих графиков, в обоих случаях имеет место устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры, а ускорения кузова в вертикальном и поперечном на-

правлениях, характеризующие комфорт пассажиров и сохранность перевозимых грузов, имеют небольшие приемлемые значения.

Таким образом, предложенная конструктивная схема электродинамической транспортной системы может рассматриваться как один из возможных вариантов при создании перспективных видов транспорта.

1. *Радченко Н. А.* Устойчивость левитационного движения электродинамического экипажа нетрадиционной упрощенной конструкции / *Н. А. Радченко, Т. Л. Губа, О. В. Звонарева* // Техническая механика. – 2011. – № 1. – С. 18 – 20.
2. *Шахунянц Г. М.* Железнодорожный путь / *Г. М. Шахунянц*. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.

Институт транспортных систем
и технологий НАН Украины „Трансмаг”,
Днепропетровск

Получено 10.06.2015,
в окончательном варианте 29.09.2015