

## КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ВДОЛЬ ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

*Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины,  
ул Писаржевского, 5, 49005, г. Днепр, Украина; E-mail NAR@westa-inter.com*

На основі розв'язання диференціальних рівнянь, що описують рух екіпажу розробленої нетрадиційної конструкції електродинамічної транспортної системи з чотирма смугами надпровідних магнітів на екіпажі з двома смугами шляхових контурів, укладених з розрідженням 1 м на плоскій шляховій структурі, оцінено коливання і стійкість його левітаційного руху вздовж прямолінійних і криволінійних ділянок шляхової структури постійної та змінної кривизни. Мета роботи – розробка рекомендацій по створенню нової електродинамічної системи. Новизна полягає в можливості використання плоскої шляхової структури і двох рядів шляхових контурів для електродинамічної транспортної системи. Результати – при раціональних значеннях основних параметрів системи має місце стійкий левітаційний рух екіпажу на прямолінійних ділянках шляху в широкому діапазоні швидкостей, а на криволінійних – швидкості обмежені значеннями допустимими показниками по прискоренню кузова в поперечному напрямку. Зроблено висновок про доцільність використання розробленої транспортної системи.

На основании решения дифференциальных уравнений, описывающих движение экипажа разработанной нетрадиционной конструкции электродинамической транспортной системы с четырьмя полосами сверхпроводящих магнитов на экипаже и двумя полосами путевых контуров, уложенных с разрежением 1 м на плоской путевой структуре, оценены колебания и устойчивость его левитационного движения вдоль прямолинейных и криволинейных участков путевой структуры постоянной и переменной кривизны. Цель работы – разработка рекомендаций по созданию новой электродинамической транспортной системы. Новизна состоит в возможности применения плоской путевой структуры и двух рядов путевых контуров для электродинамической транспортной системы. Результаты – при рациональных значениях основных параметров системы имеет место устойчивое левитационное движение экипажа на прямолинейных участках путевой структуры в широком диапазоне скоростей, а на криволинейных – скорости ограничены допускаемыми показателями по ускорениям кузова в поперечном направлении. Сделан вывод о целесообразности применения разработанной транспортной системы.

Based on the solution of differential equations of motion for the vehicle of the unconventionally designed maglev system developed, which features four lines of superconducting magnets on the vehicle and two lines of track contours laid 1 m apart on a plane track structure, the vibrations of the vehicle and the stability of its levitated motion along straight and curved track sections of constant and variable curvature are estimated. The aim of this paper is to work out recommendations for the development of a new maglev system. The novelty lies in that a plane track structure and two lines of track contours can be used in the maglev system. It is shown that at appropriate values of the basic parameters of the system the vehicle exhibits a stable levitated motion in straight track sections in a wide range of speeds, while for curved track sections the speed is limited by the admissible lateral acceleration of the vehicle body. The advisability of using the maglev system developed is demonstrated.

**Ключевые слова:** *устойчивость движения, колебания, плоская путевая структура, кривизна пути, электродинамическая транспортная система.*

Отличительной особенностью предлагаемой конструктивной схемы электродинамической транспортной системы является использование двух полос путевых прямоугольных контуров, уложенных вдоль плоского пути с разрежением 1,0 м на краях тележек, и четырех полос сверхпроводящих магнитов, расположенных попарно по две полосы над каждой полосой контуров так, что продольные оси каждой из пар магнитов находятся в одной вертикальной плоскости с соответствующими осями путевых контуров. Размеры сверхпроводящих магнитов в продольном и поперечном направлениях соответствуют 1,1 и 0,25 м. Размеры путевых контуров в поперечном направлении приняты в соответствии с полученными результатами, при которых имеет место устойчивость левитационного движения магнитов в поперечном направлении. При этом электродинамические левитационные силы взаимо-

© Н. А. Радченко, О. В. Звонарева, Т. И. Кузнецова, 2017

Техн. механіка. – 2017. – № 3.

действия магнитных полей магнитов и контуров при относительном поперечном их сдвиге в вертикальном направлении должны иметь минимальное значение, а в поперечном направлении должны быть восстанавливающими против их сдвига. Этому требованию соответствует расстояние между продольными осями каждой пары сверхпроводящих магнитов, равное 0,31 м. Диаметр путевых контуров принят равным 0,03 м, а число сверхпроводящих магнитов – 16. 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 выбираем вертикальные  $z$  и поперечные  $y$  перемещения твердых тел системы (координата  $z$  направлена сверху вниз), их угловые перемещения  $\theta, \varphi, \psi$ , соответствующие боковой качке, галопированию и вилянию, а также токи в путевых контурах.

Математическая модель движения исследуемого экипажа 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 уравнения Лагранжа II рода:

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

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

$$L \frac{dI}{dt} + rI = f, \quad (2)$$

где

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

$Q_v$  – 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 взаимной индукции ( $i \neq k$ ) путевых контуров;  $r$  – активное сопротивление путевого контура,  $I$  – вектор-столбец токов  $i_k$  в  $k$ -путевых конту-

рах,  $f$  – вектор э. д. с.  $f_k$ , наводимых сверхпроводящими магнитами экипажа в  $k$ -х путевых контурах.

Величины  $f_k$  определяются из выражения:

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

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

В выражениях (1) – (3):  $D_{qv}, \Pi_{qv}, \Phi_{qv}, Q_v$  – дифференциальные операторы и обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам  $q_v$ ;  $T, \Pi, \Phi$  – кинетическая, потенциальная энергия и функция рассеяния системы;  $F_L, F_s$  – нормальные и касательные электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов и путевых контуров.

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:

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

где  $\Delta_m$  и  $\delta_m$  – 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 левитационного его движения.

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 кН·с/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, пря-

мая – 1600 м. Кривизна переходных кривых имеет нелинейную зависимость от ее 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.

Результаты интегрирования уравнений движения показали, что на вертикальные перемещения кузова  $z_k$  и тележек  $z_i$  ( $i = 1, 2$  – номера тележек), углы их галопирования и виляния практически не оказывает влияние кривизна пути, а перемещения бокового отбоя  $y_i$  и углы боковой качки  $\theta_i$  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  $y_k$  и тележек  $y_i$ , углов их боковой качки  $\theta_k$ ,  $\theta_i$ , 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 –  $N_i$ , равных в рассматриваемом случае 690000 ампер-витков.

Результаты численного интегрирования уравнений движения (1) и (2) приведены ниже на графиках зависимостей перемещений  $z_k$  кузова и  $z_i$  тележек от пройденного пути, углов галопирования  $\varphi$ , бокового отбоя  $y$ , углов боковой качки  $\theta$ , углов виляния  $\psi$  и ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях  $\ddot{y}_k$ ,  $\ddot{z}_k$  при скоростях 30 м/с (рис. 1, 2, 3) и 100 м/с (рис. 4, 5, 6). На рисунках приняты обозначения: 1, 2 – для первой и второй тележек, 3 – для кузова,  $S \leq 150$  м и  $S \geq 1200$  м соответствуют прямолинейным участкам пути,  $S = 150 - 650$  м – входной переходной кривой,  $S = 650 - 800$  м – круговой кривой и  $S = 800 - 1200$  м – выходной переходной кривой.

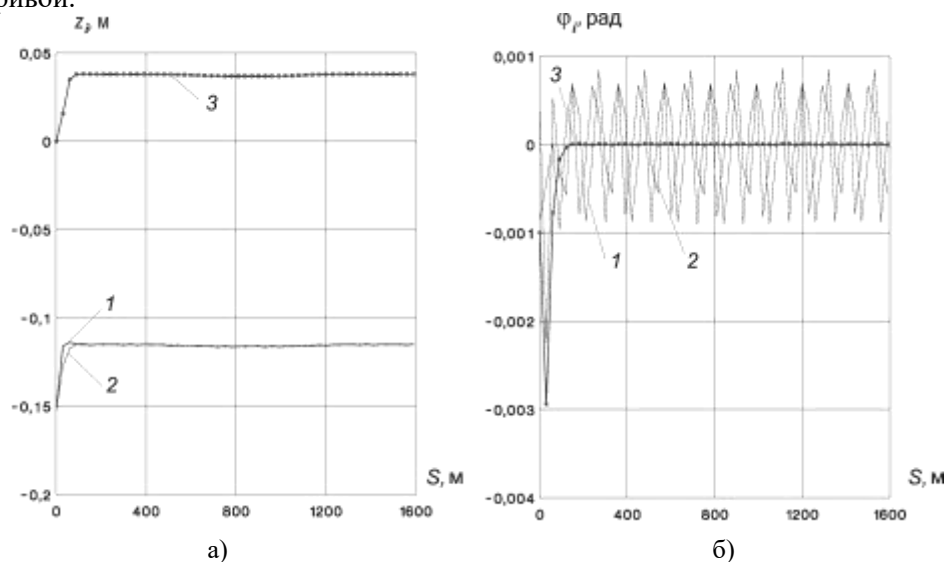
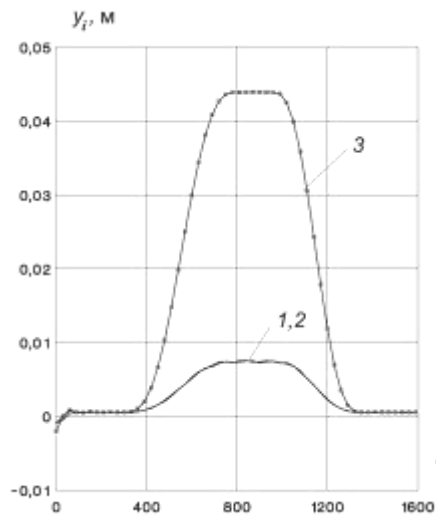
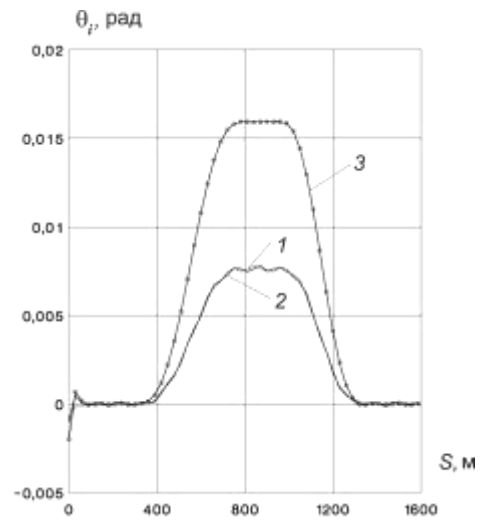


Рис. 1

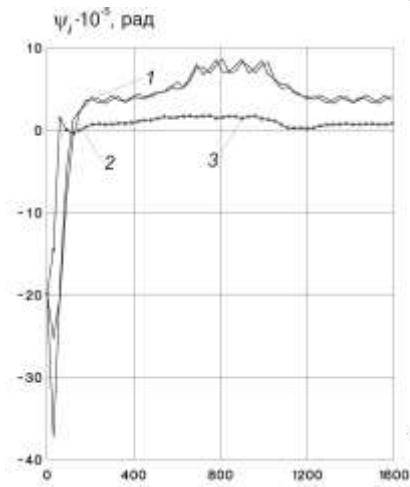


а)

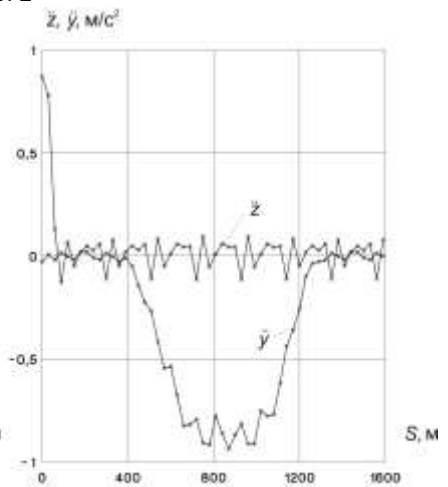


б)

Рис. 2

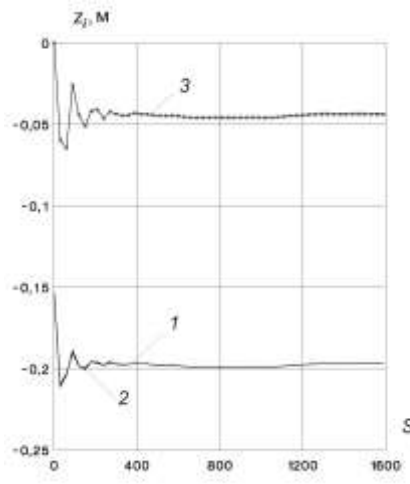


а)

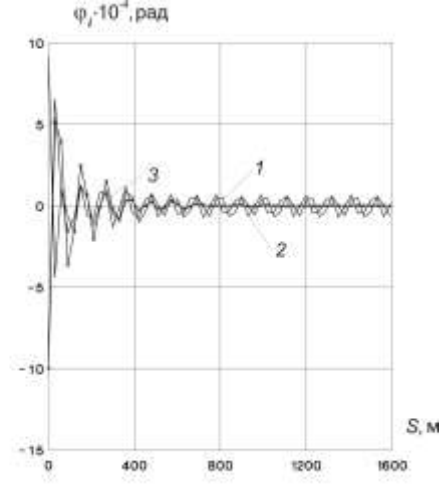


б)

Рис. 3



а)



б)

Рис. 4

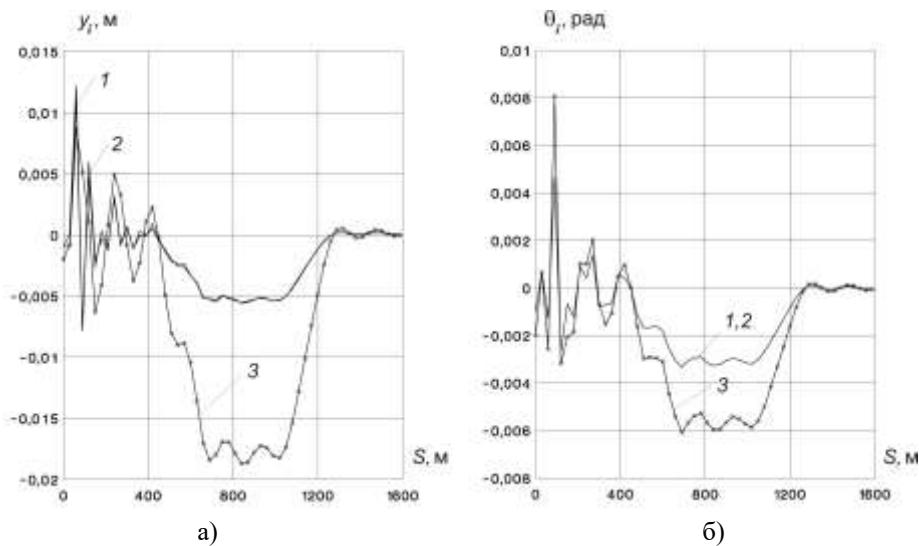


Рис. 5

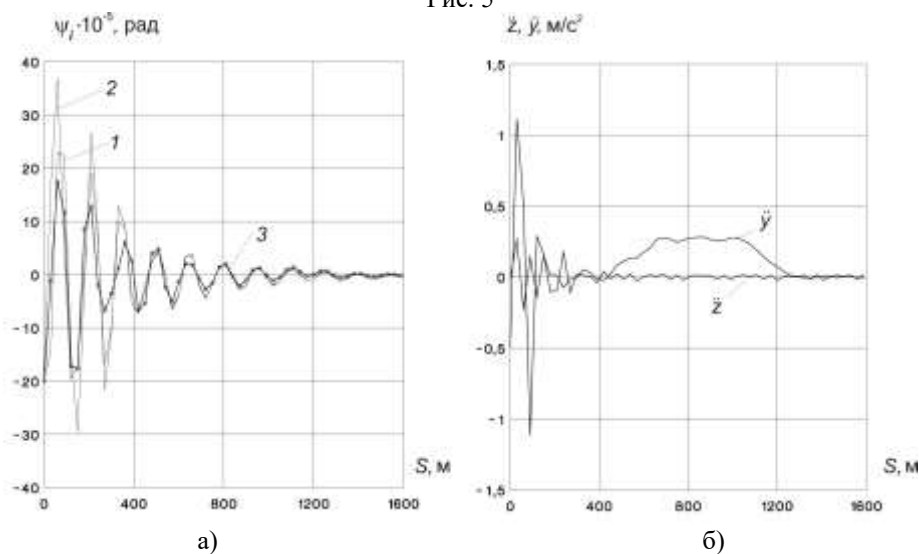


Рис. 6

Как видно из этих графиков, в обоих случаях имеет место устойчивое левитационное движение экипажа на прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры, а ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях, характеризующие комфорт пассажиров, имеют небольшие приемлемые значения.

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

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

Получено 26.07.2017,  
в окончательном варианте 11.10.2017