

УДК 001.5.629.11.534.143

В.А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, Н.А. РАДЧЕНКО, Н.М. ХАЧАПУРИДЗЕ

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

О.В. ЗВОНАРЕВА

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика Лазаряна

## КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НЕТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Предложена новая схема электродинамической транспортной системы, две пары из четырех полос путевых контуров которых уложены на разных половинках плоскостей относительно продольной оси путевой структуры, наклоненных к горизонтальной плоскости в поперечном направлении также как и плоскости двух рядов сверхпроводящих магнитов. Для экипажей этой системы оценены колебания и устойчивость левитационного движения в прямолинейных и криволинейных участках пути.*

*Ключевые слова: электродинамический транспорт, путевая структура, сверхпроводящие магниты, левитация*

В.А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, Н.А. РАДЧЕНКО, Н.М. ХАЧАПУРИДЗЕ

Институт транспортних систем і технологій НАН України

О.В. ЗВОНАРЕВА

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка Лазаряна

## КОЛИВАННЯ ТА СТІЙКІСТЬ ЛЕВИТАЦІЙНОГО РУХУ ЕКІПАЖУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ НЕТРАДИЦІЙНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

*Запропонована нова схема електродинамічної транспортної системи, дві пари з чотирьох полос шляхових контурів якої укладені на різних половинках площин відносно поздовжньої осі шляхової структури, що мають ухил до горизонтальної площини в поперечному напрямку також як і площини двох рядів надпровідних магнітів. Для екіпажу цієї системи оцінені коливання та стійкість левітаційного руху в прямолінійних та криволінійних ділянках шляху.*

*Ключові слова: електродинамічний транспорт, шляхова структура, надпровідні магніти, левітація*

V.A. DZENZERSKIY, N.A. RADCHENKO, N.M. KHATCHAPURIDZE

Institute of Transport Systems and Technologies of NASU.

O.V. ZVONAROVA

Dnipropetrovsk national university of railway transport.

## OSCILLATIONS AND STABILITY OF LEVITATING MOTION OF ELECTRODYNAMIC TRANSPORT SYSTEM ALTERNATIVE CONSTRUCTION

*A new scheme of electrodynamic transport system with four lanes of travel circuits on a flat track structure is proposed. The circuits, as well as the superconducting magnets, are inclined to the horizontal plane in the transverse direction. Oscillations and stability of levitation motion of this system in the rectilinear and curvilinear sections of the track are investigated.*

*Keywords: electrodynamic transport, track structure, superconducting magnets, levitation*

### Постановка проблемы

В предлагаемой конструктивной схеме электродинамической системы предусмотрена укладка 4-х полос контуров, каждые две пары которых уложены на полуплоских участках путевой структуры, наклоненных относительно горизонтальной плоскости в поперечном противоположном направлении ( $\gamma = 0,1$  рад) также как и две пары сверхпроводящих магнитов (см. рис. 1). Длина соленоидов сверхпроводящих магнитов и путевых контуров принята равной 1,2 и 1 м, а их ширина соответственно 0,5 и 0,3 м. Расстояние между соседними контурами в продольном направлении принято 1,2 м, а в поперечном – 0,04 м, диаметр прутков путевых контуров прямоугольного очертания в плане 0,13 м.

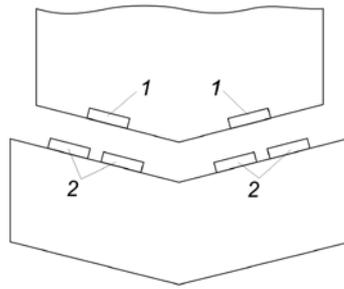


Рис.1 Схема взаимодействия магнитов (1) и путевых контуров (2)

### Анализ публикаций по теме исследования

В институте транспортных систем и технологий НАН Украины выполнен большой цикл работ, посвященных данной тематике [1]. Однако, оговоренные выше особенности транспортной системы не принимались во внимание.

### Цель статьи

Цель статьи: оценить устойчивость левитационного движения экипажа этой системы вдоль путевой структуры в случае, когда на каждой из двух тележек экипажа крепятся по 16 сверхпроводящих магнитов и четыре полосы путевых контуров.

### Основная часть

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  $\theta, \varphi, \psi$ , 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-го рода, которые можно представить в виде:

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

и уравнений токов, которые в матричном виде имеют вид:

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

где

$$D_{qv} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v}; \quad \Pi_{qv} = \frac{\partial \Pi}{\partial q_v}; \quad (3)$$

$$\Phi_{qv} = \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v}; \quad Q_v = \varphi(F_L, F_S);$$

$Q_v$  - 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  $k$ -х путевых контурах,  $f$  - вектор э.д.с.  $f_k$  наводимых экипажными сверхпроводящими магнитами в  $k$ -х путевых контурах.

В выражениях (1, 2, 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, определяемых в соответствии с [1];  $N$  – число степеней свободы системы.

Величины  $f_k$  определяются выражением:

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

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

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

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 движения экипажа.

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 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 25т и 3,75т, значений коэффициентов жесткости и вязкости упруго-диссипативных элементов в продольном и поперечном направлениях, равных соответственно 200кН/м и 20 кНс/м.

Для экипажа, описанной транспортной системы было оценено левитационное движение вдоль пути  $S$ , имеющего следующее очертание в плане: прямолинейный участок пути протяженностью 150 м, входная переходная кривая длиной 500 м ( $S=150-650$  м), круговая кривая радиусом 8000 м с наклоном поверхности пути к горизонтальной плоскости на угол 0,1 рад в сторону центра кривизны ( $S=650-800$  м), выходная переходная кривая ( $S=800-1200$  м), прямая ( $S=800-1200$  м). Кривизна переходных кривых имеет 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.

Рассмотрим приведенные результаты интегрирования уравнений движения (1) и (2) в виде графиков зависимостей величин перемещений от пройденного пути  $z$  кузова и тележек, углов галопирования  $\Phi$ , бокового отбоя  $u$ , боковой качки  $\theta$ , углов виляния  $\psi$  и ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях  $\ddot{y}_k, \ddot{z}_k$  при скорости 100 м/с (рис.2,3,4), где линии 3а, 3б соответствуют кузову, а 1а, 1б и 2а, 2б – 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.

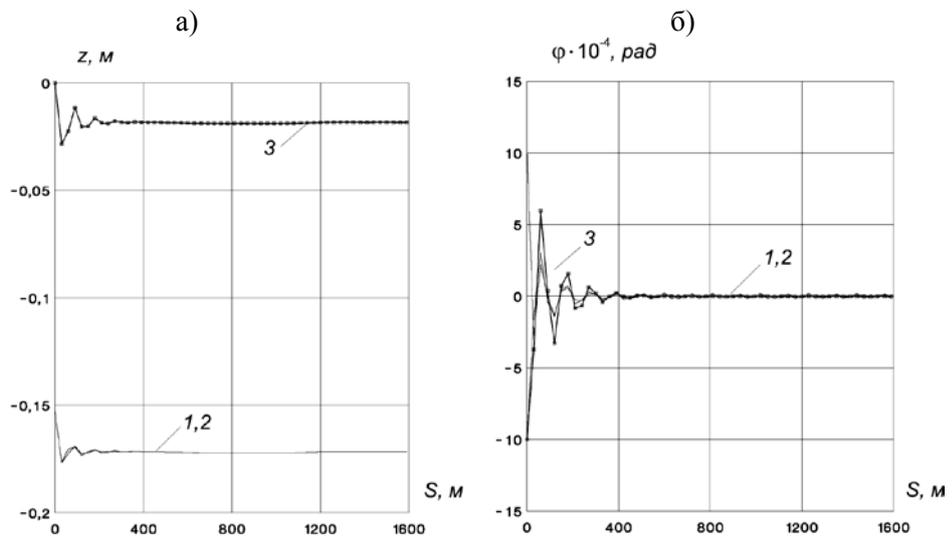


Рис.2 Зависимости перемещений подпрыгивания (а) и галопирования (б) от пройденного пути

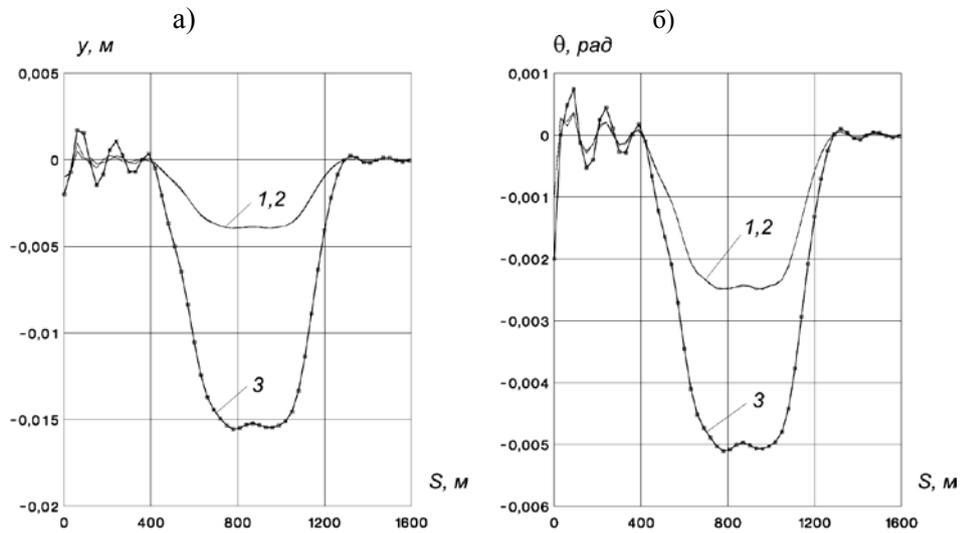


Рис.3 Зависимости перемещений бокового отбоя (а) и боковой качки (б) от пройденного пути

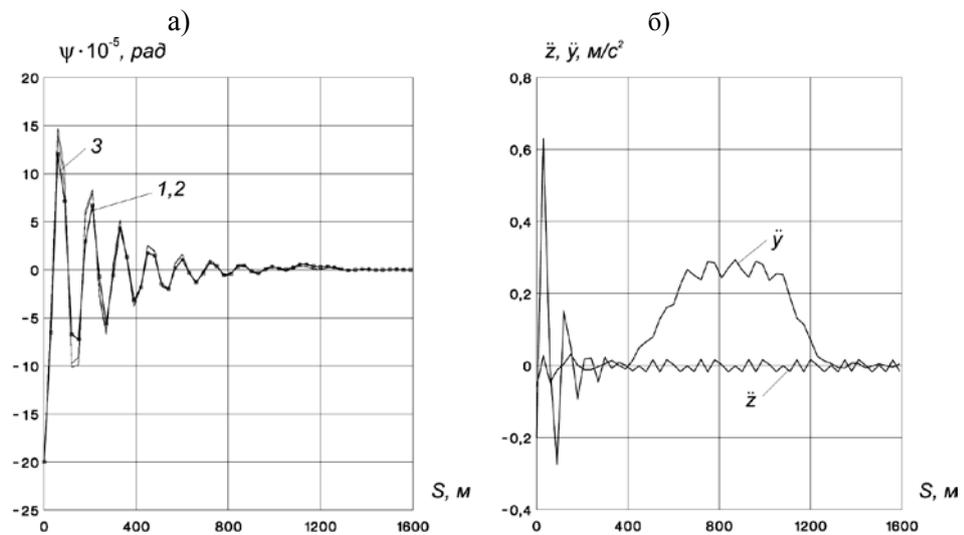


Рис.4 Зависимости углов виляния (а) и ускорений кузова (б) от пройденного пути

Результаты интегрирования уравнений движения показали, что на вертикальные перемещения кузова и тележек  $z_i$  ( $i = 1, 2$  – номера тележек), углы их галопирования и влияния практически не оказывает влияния 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 и тележек  $y_k$  и  $y_i$ , 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 700000 ампер-витков

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Как видно из приведенных графиков имеет место устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры, а ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях, характеризующие комфорт пассажиров и сохранность перевозимых грузов, имеют небольшие приемлемые значения. Аналогичные результаты получены также и при скорости 30 м/с. Таким образом, предложенная конструктивная схема может рассматриваться как один из вариантов при создании перспективных видов транспорта.

#### Список использованной литературы

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.
2. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. / Г.М. Шахунянц -М.: Транспорт 1969.-536 с.