

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
Д-кий нац. ун-т жд тр-та им акад.В. Лазаряна

КОЛЕБАНИЯ И 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.

Ключевые слова: электродинамический транспорт, плоская путевая структура, устойчивость движения, колебания.

УДК 001.5.629.11.534.143

В.О. ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ,
М.А. РАДЧЕНКО, Н.М. ХАЧАПУРИДЗЕ
Институт транспортних систем и технологій НАН України
О.В. ЗВОНАРЬОВА
Дн-кий нац. ун-т залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна

КОЛИВАННЯ ТА СТІЙКІСТЬ ЛЕВИТАЦІЙНОГО РУХУ ЕКІПАЖУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ З ПЛОСКОЮ ШЛЯХОВОЮ СТРУКТУРОЮ

Запропонована нова схема левітаційної транспортної системи з електродинамічним підвісом і плоскою колійною структурою. Ціль статті складається в оцінці просторових коливань і стійкості руху екіпажу електродинамічної транспортної системи. Метод дослідження - теоретичний, числовий. Наведені результати досліджень, що показують для запропонованої конструктивної схеми транспортної системи з чотирма смугами надпровідних магнітів та двома смугами шляхових контурів має місце стійкості прямолінійного і криволінійного левітаційного руху екіпажу і прийнятні показники комфорту пасажирів.

Ключові слова: електродинамічний транспорт, плоска шляхова структура, стійкість руху, коливання.

УДК 001.5.629.11.534.143

V.A. DZENZERSKIY,
N.A. RADCHENKO, N.M. KHACHAPURIDZE
Institute of Transport Systems and Technologies of NASU.
O.V. ZVONAREVA
DNURT

OSCILLATIONS AND STABILITY OF LEVITATING MOTION OF ELECTRODYNAMIC TRANSPORT SYSTEM WITH FLAT TRACK

The new scheme for a levitating transport system with electrodynamic suspension, consisting of four rows of superconducting magnets and two lanes of circuits on a flat track structure is proposed. The purpose of the article is to evaluate the spatial oscillations and stability of motion of the system. The methods of research are theoretical and numerical. The obtained results show that the proposed system is stable under rectilinear and curvilinear motion and provides acceptable passenger comfort.

Keywords: electrodynamic transport, flat track structure, stability of motion, oscillations.

Постановка проблемы. 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 оценить устойчивость 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 с левой и правой сторонам 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 каждого из двух соседних рядов сверхпроводящих магнитов соответствует 0,205 м.

Анализ публикаций по теме исследования. В институте транспортных систем и технологий НАН Украины выполнена работа, посвященная этой тематике [1]. Однако, оговоренные выше особенности транспортной системы не принимались во внимание.

Цель статьи состоит в установлении возможности использования описанной конструктивной схемы электродинамической транспортной системы при ее создании.

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 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-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, Π, Φ – 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 взаимоиндукции 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 Δ_m и δ_m – значения зазоров, т. е. смещений m -ых сверх-проводящих 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 Φ , бокового отбоя u , боковой качки θ , углов виляния ψ и ускорений кузова в вертикальном и поперечном направлениях \ddot{y}_k, \ddot{z}_k при скорости 100 м/с (рис.1,2,3), 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.

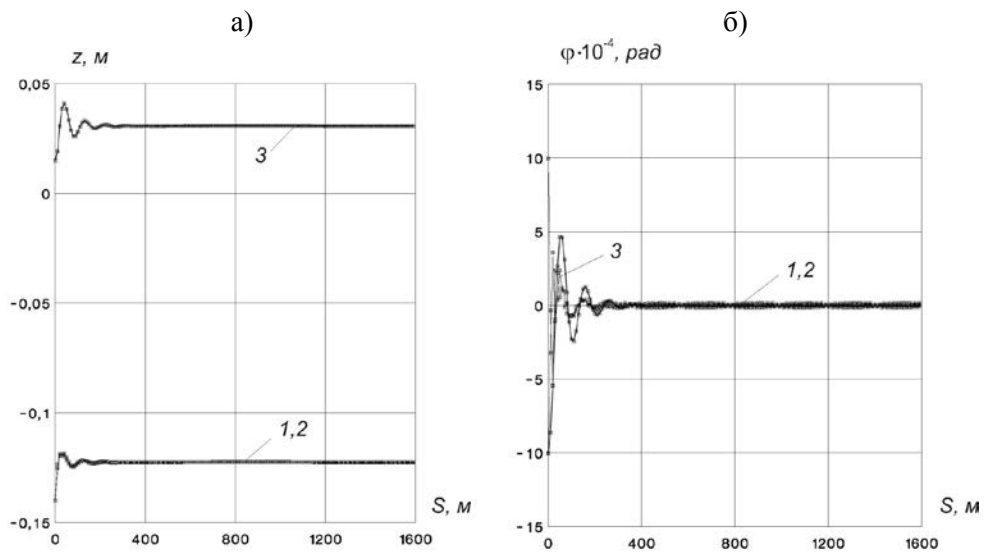


Рис.1 Зависимости перемещений подпрыгивания (а) и галопирования (б) от пройденного пути

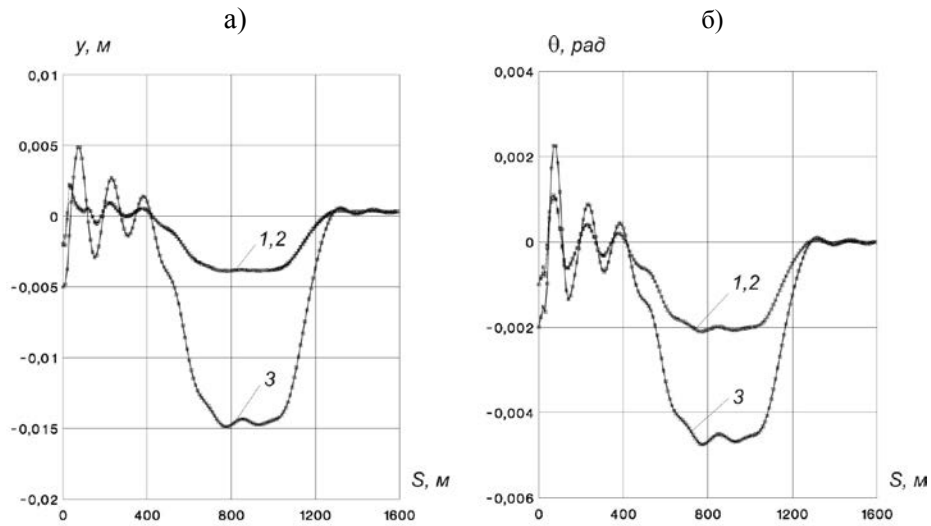


Рис.2 Зависимости перемещений бокового отбоя (а) и боковой качки (б) от пройденного пути

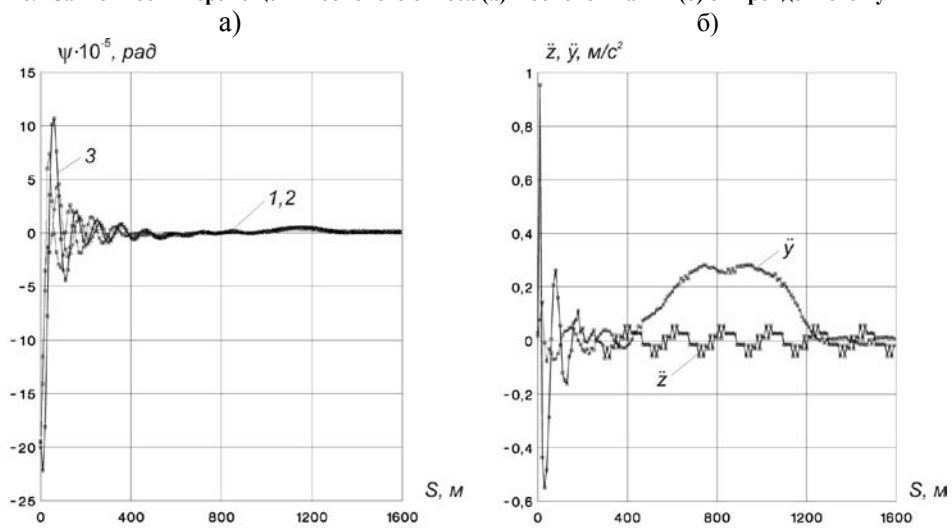


Рис.3 Зависимости углов виляния (а) и ускорений кузова (б) от пройденного пути

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 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 , углов 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 – 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.

Литература

1. Дзензерский В.А. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций на сверхпроводящих магнитах / В.А. Дзензерский, Н.А. Радченко, В.В. Мальй // Днепропетровск. – Арт-Пресс. – 2011. – 248 с.
2. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. / Г.М. Шахунянц -М.: Транспорт 1969.-536 с.

Дзензерский Виктор Александрович – д.т.н., профессор, директор Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

- динамика наземных транспортных систем, энергосберегающие технологии.

Звонарева Ольга Витальевна - к.ф.-м.н., доцент ДНУЖТ.

Научные интересы:

- динамика транспортных электромеханических систем.

Радченко Николай Алексеевич – д.т.н., ст. научн. сотр., вед. научн. сотрудник Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

- динамика наземного транспорта.

Хачапуридзе Николай Михайлович – к.т.н., ст. научн. сотр., зам. директора по научной работе Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

- динамика наземных транспортных систем.