

ОЦЕНКА ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НЕТРАДИЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

На основании решения дифференциальных уравнений, описывающих движение экипажа разработанной нетрадиционной конструкции электродинамической транспортной системы с двумя полосами сверхпроводящих магнитов на экипаже и с одной полосой путевых контуров на плоской путевой структуре, оценена устойчивость его левитационного движения вдоль прямолинейных и криволинейных участков путевой структуры постоянной и переменной кривизны. Цель работы – разработка рекомендаций для создания новой электродинамической транспортной системы. Новизна состоит в возможности применения плоской путевой структуры и одного ряда путевых контуров для электродинамической транспортной системы, методы – теоретические исследования. Результаты – при рациональных значениях основных параметров системы имеет место устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных участках путевой структуры в широком диапазоне скоростей, а в криволинейных – скорости ограничены допустимыми показателями по ускорениям кузова в поперечном направлении. Сделан вывод о целесообразности применения разработанной транспортной системы.

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

Based on the solution of differential motion equations for the vehicle with developed nonstandard design of an electrodynamic transport system having two lines of superconducting magnets on the vehicle and one line of track contours on a plane track structure, the stability of its levitated motion on straight and curved tracks with constant and variable curvatures is evaluated. The work goal is to develop recommendations for creation of a new electrodynamic transport system. Novelty lies in the possibility of applying a plane track structure and one row of track contours for an electrodynamic transport system. The methods used are theoretical investigations. The results: a stable levitated motion of the vehicle on straight paths of the track structure in a wide range of speeds occurs with rational values of the basic parameters of the system; on curved tracks speeds are limited by permissible factors on accelerations of the body in a transversal direction. We can conclude that the transport system developed is effective.

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

В разработанных конструктивных схемах электродинамических транспортных систем с плоской путевой структурой рассмотрены различные варианты использованного числа полос путевых контуров и сверхпроводящих магнитов на экипаже [1]. В одном из вариантов было оценено левитационное движение экипажа, в котором использовались две полосы короткозамкнутых контуров и две полосы сверхпроводящих магнитов, оси которых находились в одной вертикальной плоскости.

Отличительными особенностями предлагаемой конструктивной схемы электродинамической транспортной системы является использование вместо двух полос путевых контуров одной полосы и двух полос 12-ти сверхпроводящих магнитов, взаимодействующих с полосой контуров по их крайним продольным сторонам. Так, в предлагаемой транспортной системе предполагается использование контуров диаметром 0,03 м, длина и ширина которых равна 1,0 и 1,5 м, а магнитов – 1,2 и 0,5 м. Причем их продольные оси сдвинуты относительно друг друга в обе стороны поперечного направления на

0,7 м. Расстояние в продольном направлении между путевыми контурами принято 1,1 м. Цель статьи состоит в разработке рекомендаций для создания новой модернизированной электродинамической транспортной системы.

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 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

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

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

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 сверхпроводящими магнитами экипажа 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 си-

системы; F_L, F_S – нормальные и касательные электродинамические силы взаимодействия сверхпроводящих магнитов и путевых контуров.

Величины f_k определяются из выражения:

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

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.

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:

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

где Δ_m и δ_m – значения зазоров, т. е. смещений m -ых 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 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 пути.

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 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 поверх-

ности пути к горизонтальной плоскости на угол 0,1 рад в сторону центра кривизны протяженностью 150 м, выходная переходная кривая – 400 м, прямая – 2700 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.

Результаты интегрирования уравнений движения (1) и (2) приведены ниже на графиках зависимостей от пройденного пути перемещений z кузова и тележек, углов галопирования φ , бокового отбоя y , боковой качки θ , углов виляния ψ 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), где линии 3а, 3б соответствуют кузову, 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.

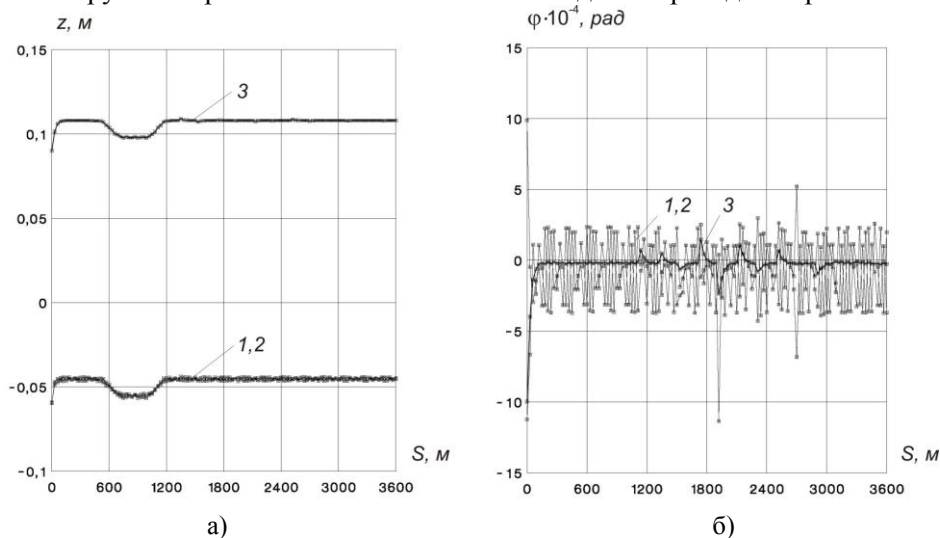


Рис. 1

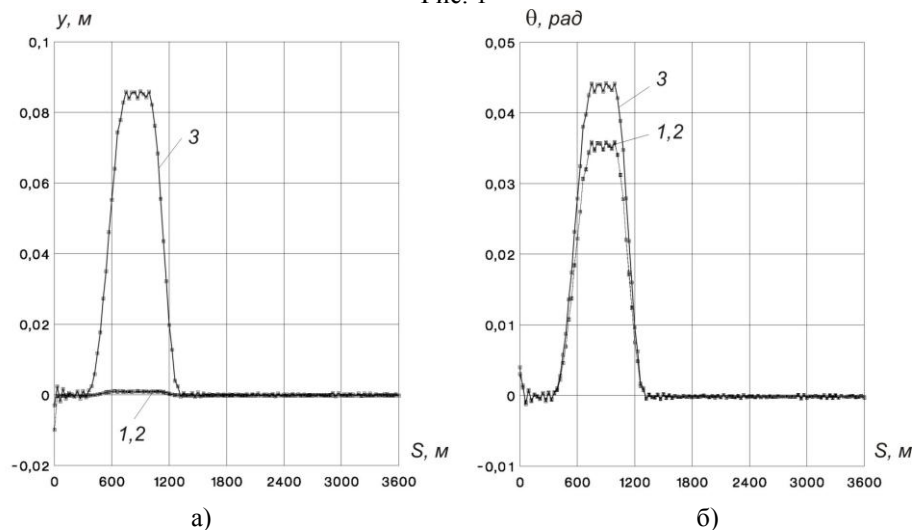


Рис. 2

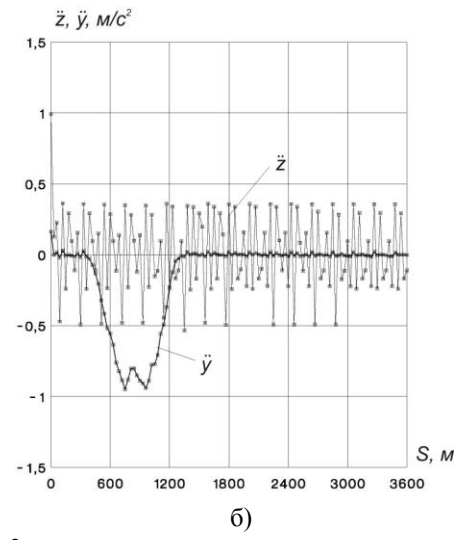
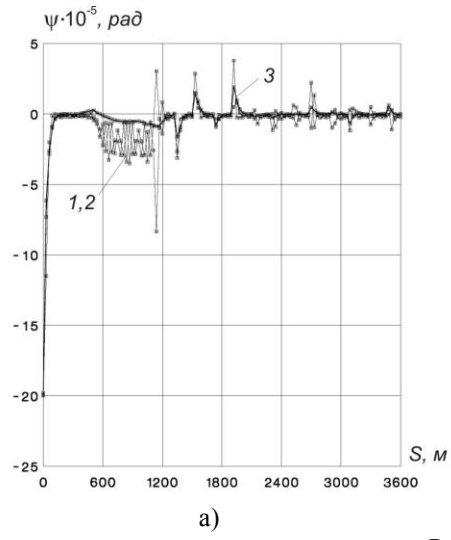


Рис. 3

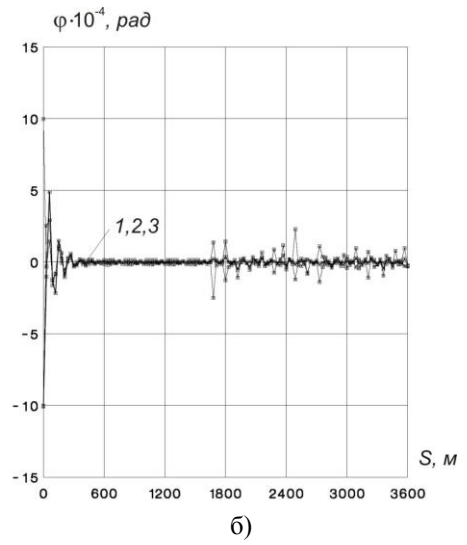
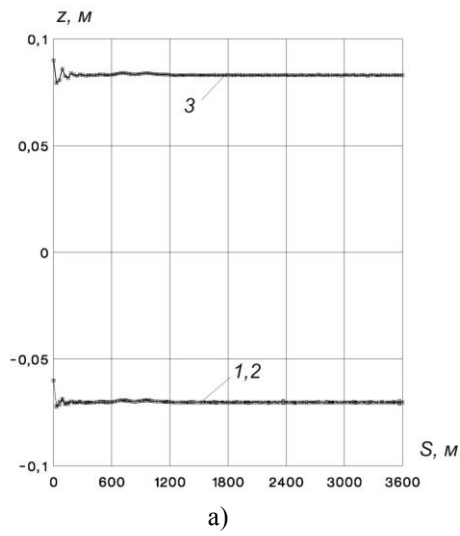


Рис. 4

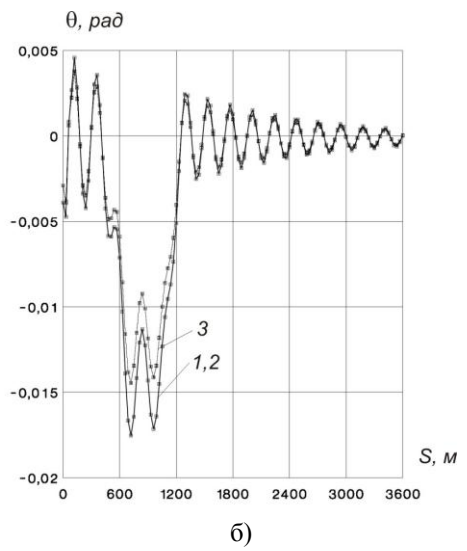
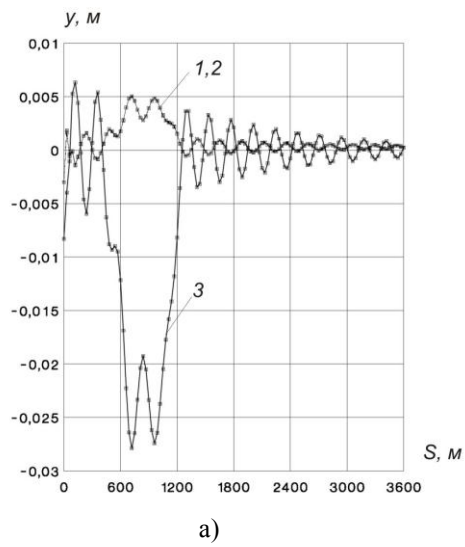


Рис. 5

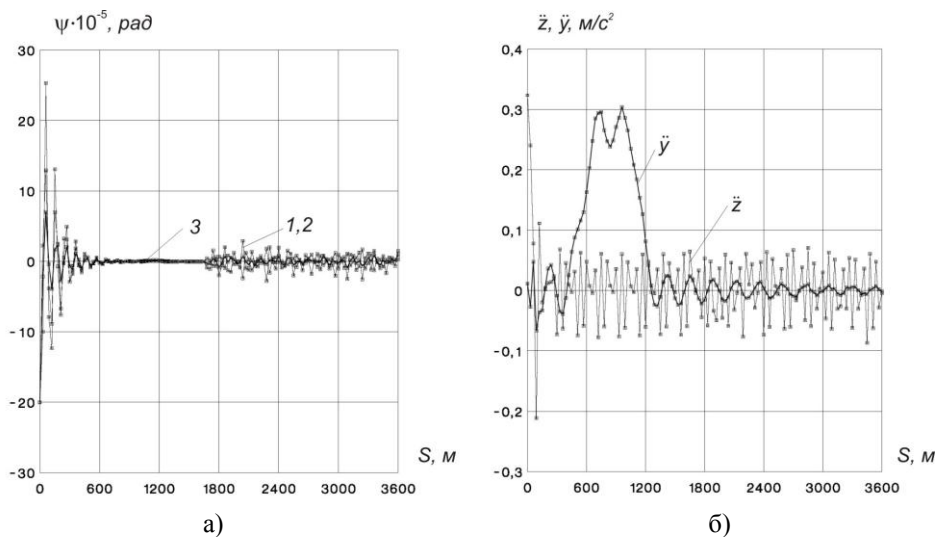


Рис. 6

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 отбоя u_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 u_k и u_i , углам их боковой качки θ_k , θ_i , по вертикальным перемещениям тележек $z_{i,}$, по значениям ускорений кузова в поперечном и вертикальном направлениях \ddot{y}_k , \ddot{z}_k соответственно и по значениям намагничивающих сил в соленоидах, обеспечивающих левитационное движение, равным в рассматриваемом случае 1055000 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 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. 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. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахуняц. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.